

FACULTE DE MEDECINE DE PARIS

ANNÉE 1959

THÈSE ^{N°} 1052

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(DIPLOME D'ETAT)

PAR

BRESSON Yves, Joseph, Paulin

Né le 5 Mars 1933, à Bamako (Soudan)

Assistant Délégué

au Laboratoire de Physique de la Faculté.

Présentée et soutenue publiquement le

**CONTRIBUTION A LA DETERMINATION
DES COULEURS FONDAMENTALES.**

**(Etude statistique de la sensation chromatique
au voisinage du seuil).**

Président : Mr. L. GOUGEROT, Professeur.

Ets. GERMAIN
9, Rue Dupuytren
PARIS-VI^e
1959

FACULTE DE MEDECINE DE PARIS

ANNÉE 1959

N°

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(DIPLOME D'ETAT)

PAR

BRESSON Yves, Joseph, Paulin

Né le 5 Mars 1933, à Bamako (Soudan)

Assistant Délégué

au Laboratoire de Physique de la Faculté.

Présentée et soutenue publiquement le



CONTRIBUTION A LA DETERMINATION DES COULEURS FONDAMENTALES.

(Etude statistique de la sensation chromatique
au voisinage du seuil).

Président : Mr. L. GOUGEROT, Professeur.

Ets. GERMAIN
9, Rue Dupuytren
PARIS-VI^e
1959

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. AUBIN (A.), BENARD (H.), BROCC (P.),
 BULLIARD (H.), CADENAT (F.), CHABROL (E.),
 CHAMPY (C.), CHEVALLIER (P.), DEBRE (R.),
 DONZELOT (E.), GASTINEL (P.), GUILLAIN (G.),
 HALPHEN (E.), HARVIER (P.), HAZARD (R.), HEUYER (G.),
 LANTUEJOUL (P.), LAROCHE (G.), LAUBRY (C.),
 LEVY-SOLAL (E.), LHERMITTE (J.), LIAN (C.),
 LOEPER (M.), MARION (G.), MATHIEU (P.), MOCQUOT (P.),
 MONDOR (H.), MONOD (R.), MOREAU (R.), MULON (P.),
 OLIVIER (E.), RICHET (C.), STROHL (A.), TANON (L.),
 VELTER (E.).

DOYEN : Léon BINET,
 Membre de l'Institut.

ASSEESSEUR : Jean VERNE.

I.- PROFESSEURS

	MM.
Anatomie	CORDIER (G.)
Anatomie (Chaire à titre personnel)	DELMAS (A.)
Anatomie pathologique	DELARUE (J.)
Anesthésiologie	BAUMANN (J.)
Bactériologie	FASQUELLE (R.)
Biochimie médicale	JAYLE (M.F.)
Biologie appliquée à l'Education physique et aux Sports	CHAILLEY-BERT (P.)
Biologie médicale	FAUVERT (R.)
Cancérologie médicale et sociale	BERNARD (J.)
Clinique carcinologique	REDON (H.)
(Inst. G. Roussy)	
Clinique cardiologique (Brussais)	MOUQUIN (M.)
(Beaujon)	SICARD (A.)
(Cochin)	QUENU (J.)
Cliniques chirurgicales {Hôtel-Dieu	MENEGAUX (G.)
{Saint-Antoine	GOSSET (J.)
{Salpêtrière	MOULONGUET (P.)

Clinique de chirurgie infantile et orthopédique (Enfants-Malades)	FEVRE (M.)
Clinique chirurgicale orthopédique et réparatrice (Cochin)	MERLE D'AUBIGNE (R.)
Clinique de chirurgie cardio- vasculaire (Broussais)	GAUDART-D'ALLAINES (F.de)
Clinique de chirurgie pleuro- pulmonaire (Laënnec)	MATHEY (J.)
Clinique endocrinologique (Pitié)	DECOURT (J.)
Clinique génétique médicale (Enfants-Malades)	LAMY (M.)
Clinique gynécologique (Broca)	FUNCK-BRENTANO (P.)
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques (St-Louis)	DEGOS (R.)
Clinique des maladies des enfants (Enfants-Malades)	CATHALA (J.)
Clinique des maladies infectieuses (Claude-Bernard)	MOLLARET (P.)
Clinique des maladies mentales et de l'encéphale (Ste-Anne)	DELAY (J.)
Clinique des maladies métaboliques (Necker)	HAMBURGER (J.)
Clinique des maladies du sang (Broussais)	MARCHAL (G.)
Clinique des maladies du système nerveux (Salpêtrière)	ALAJOUANINE (T.)
	(Broussais) GENNES (L. de)
	(Cochin) JUSTIN-BESANÇON (L.)
Cliniques médicales	(Hôtel-Dieu) BARIETY (M.)
	(Lariboisière) SOULIÉ (P.)
	(Pitié) DREYFUS (G.)
	(St-Antoine) KOURILSKY (R.)
Clinique médicale d'hydrologie thérapeutique et climatologie (Bichat)	DEBRAY (C.)
Clinique médicale préopédatrice	PASTEUR VALLERY-RADOT (P.)
Clinique médico-sociale du diabète sucré et des maladies de la nutrition (Hôtel-Dieu)	DEROT (M.)
Clinique de neuro-chirurgie (Pitié)	PETIT-DUTAILLIS (D.)
	(Baudelocque) LACOMME (M.)
Cliniques obstétricales	(Port-Royal) N...
	(Tarnier) VARANGOT (J.)
Clinique ophtalmologique (Hôtel-Dieu)	RENARD (G.)
Clinique oto-rhino-laryngologique (Lariboisière)	AUBRY (M.)

MM.

Clinique de pédiatrie sociale (Enfants-Malades)	MARIE (J.)
Clinique de pneumo-ptisiologie (Laënnec)	BERNARD (E.)
Clinique psychiatrique infantile (Salpêtrière)	MICHAUX (L.)
Clinique de puériculture (St-Vincent-de-Paul)	LELONG (M.)
Clinique de rhumatologie médicale et sociale (Cochin)	COSTE (F.)
Clinique stomatologique (Pitié)	DECHAUME (M.)
Clinique thérapeutique chirurgicale (Vaugirard)	SENEQUE (J.)
Clinique thérapeutique médicale (St-Antoine)	LEMAIRE (A.)
Clinique urologique (Cochin)	FEY (B.)
Electrophysiologie médicale (chaire à titre personnel)	DJOURNO (A.)
Embryologie	GIROUD (A.)
Histoire de la médecine et de la chirurgie	N...
Histologie	VERNE (J.)
Hygiène des collectivités (chaire à titre personnel)	DEPARIS (M.)
Hygiène et clinique de la première enfance (Trousseau)	TURPIN (R.)
Hygiène et médecine préventive	JOANNON (P.)
Médecine du Travail	DESOILLE (H.)
Médecine légale	PIEDELIEVRE (R.)
Parasitologie	GALLIARD (H.)
Pathologie chirurgicale	COUVELAIRE (R.)
Pathologie exotique	LAVIER (G.)
Pathologie expérimentale et comparée	LENEGRE (J.)
Pathologie humorale et immunologie expérimentale (ch. à titre personnel)	MERKLEN (F.-P.)
Pathologie médicale	N...
Pathologie & thérapeutique générales	GARCIN (R.)
Pharmacologie & matière médicale	CHEYMOL (J.)
Physiologie	BINET (L.)
Physiologie (ch. à titre personnel)	BARGETON (D.)
Physique médicale	DOGNON (A.)
Radiologie médicale	DESGREZ (H.)
Technique chirurgicale	PATEL (J.)
Thérapeutique	BROUET (G.)

II.- PROFESSEURS SANS CHAIRE,
PROFESSEURS AGREGES,
ET MAITRES DE CONFERENCES - AGREGES

MM.

Anatomie	{ CABROL (C.) { COUINAUD (C.) { OLIVIER (G.)
Anatomie pathologique	{ GAUTHIER-VILLARS (Melle P.) { pr. s. ch. { BUSSER (F.) { GUYGOU (Ch.) { ORCEL (L.) { PAILLAS (J.)
Anesthésiologie	VOURC'H (G.)
Bactériologie	{ NEVOT (A.), pr. s. ch. { BARBIER (P.) { CHRISTOL (D.) { TOURNIER (P.) { DESGREZ (P.), pr. s. ch.
Biochimie médicale	{ POLONOVSKI (J.), m. conf. { SCHAPIRA (G.), m. conf.
Biologie médicale	BOURLIERE (F.), m. conf.
Carcinologie	{ DENOIX (P.) { MATHE (G.)
Dermato-Syphiligraphie	DUPERRAT (B.)
Electro-Radiologie	LEDOUX-LEBARD (G.)
Embryologie	TUCHMANN-DUPLESSIS (H.)
Hématologie	{ BILSKI-PASQUIER (G.) { DAUSSET (J.)
Histologie	{ COUJARD (R.), pr. s. ch. { MAROIS (M.) { RACADOT (J.)
Hydrologie	CORNET (A.)
Hygiène	{ BOYER (J.), pr. s. ch. { CORRE-HURST (Mme L.)
Maladies infectieuses	{ BASTIN (R.) { DUPONT (V.)
Médecine légale	{ DEROBERT (L.), pr. s. ch. { HADENGUE (A.) { FOURNIER (E.) { GUENIOT (M.)
Médecine du travail	ALBAHARY (C.)
Neuro-chirurgie	DAVID (M.)

Neurologie	MM. LHERMITTE (F.) GRANJON (A.) HERVET (E.) LE LORIER (G.)
Obstétrique	MORIN (P.) MUSSET (R.) ROBEY (M.) THOYER-ROZAT (J.)
Ophthalmologie	(BREGEAT (P.) SARAUX (H.)
Orthopédie	(JUDET (R.) RAMADIER (J.)
Oto-rhino-laryngologie	DEBAIN (J.)
Parasitologie	{ BRUMPT (L.C.), pr.s.ch. CHABAUD (A.) BARCAT (J.) BINET (J.-P.) CAUCHOIX (J.) CHATELIN (C.-L.) DUBOST (Ch.) DUBOST (Cl.)
Pathologie chirurgicale	FAUREL (J.) FLABEAU (F.) GERMAIN (A.) LAURENCE (G.), agr. per. LORTAT-JACOB (J.-L.) LOYGUE (J.) MERCADIER PERROTIN (J.) ROBERT (H.) THOMERET (G.)
Pathologie exotique	SCHNEIDER (J.) CROSNIER (J.) HARTMANN (L.)
Pathologie expérimentale	LOEPER (J.) MAURICE (J.) PLAS (F.) RICHEL (G.) (AUSSANNAIRE (M.) BOUR (H.) BOUVIER (J.) BOUVRAIN (Y.)
Pathologie médicale	

MM.

Pathologie médicale.....	(BRICAIRE (H.) BRISSAUD (H.) BROCARD (H.) BUGE (A.) CASTAIGNE (P.), m. conf CATINAT (J.) CONTAMIN (F.) COURY (C.) FREZAL (J.) HOUSSET (E.) LAROCHE (Cl.) LESOBRE (R.) MACREZ (C.) NICK (J.) PEQUIGNOT (H.), m. conf ROYER (P.) WOLFROMM (R.)
Pédiatrie-Puériculture.....	(JOSEPH (R.) MANDE (R.) MOZZICONACCI (P.) POLONOVSKI (C.) ROSSIER (A.)
Pharmacologie.....	(LEVY (Mlle J.), pr. s. ch. BOISSIER (J.) LECHAT (P.)
Physiologie.....	(PARROT (J.), pr. s. ch. DEJOURS (P.)
Physique médicale.....	GOUGEROT (L.), m. conf.
Pneumo-ptisiologie.....	KREIS (B.)
Psychiatrie.....	PICHOT (P.)
Psychiatrie infantile.....	DUCHÉ (D.)
Rhumatologie.....	DELBARRE (F.)
Stomatologie.....	(CERNEA (P.) CHAPUT (Mme A.), m. c. agr. GRELLET (M.)
Thérapeutique.....	(CHASSAGNE (P.) LAMOTTE (M.)
Urologie.....	QUENU (L.)

III.- PROFESSEURS SANS CHAIRE ET AGREGES
CHARGES DE COURS DE CLINIQUE ANNEXE
à titre permanent.

	MM.
	(ABOULKER (P.))
	(AMELINE (A.))
Clinique chirurgicale.....	(HUGUIER (J.))
	(LEGER (L.))
	(OLIVIER (C.))
	(PADOVANI (P.))
	(POILLEUX (F.))
	(ROUX (M.))
	(VERNE (J.-M.))
	(HAGUENEAU (J.), pr.s.ch.)
	(BOUDIN (G.))
	(CONTE (M.))
Clinique médicale.....	(DOMART (A.))
	(MILLIEZ (P.))
	(PERRAULT (M.))
	(RAMBERT (P.))
	(THIEFFRY (S.))
	(TURIAF (J.))
Clinique neuro-rhumatologique.....	SEZE (S. de)
	(GRASSET (J.))
	(LEPAGE (F.))
Clinique obstétricale.....	(MAYER (M.))
	(MERGER (R.))
	(RAVINA (J.))
	(DESVIGNES (P.))
Clinique ophtalmologique.....	(OFFRET (G.))
Clinique oto-rhino-laryngologique.....	MADURO (R.)
Clinique pédiatrique et puériculture.....	LAPLANE (R.)
Clinique psychiatrique.....	BARUK (H.)
Clinique urologique.....	KUSS (R.)

IV.- PROFESSEURS DÉTACHÉS
DANS LES UNIVERSITÉS ÉTRANGÈRES
MM.

Bactériologie HAUDUROY (P.), Pr.s.ch.
Biochimie médicale ETTORI (J.), Pr. à t.pers.
Pathologie chirurgicale RUDDLIER (J.), Pr. s. ch.

Secrétaire général de la Faculté Mr. LENA (J.)

Secrétaires Mme BEURLAND (H.),
Mlle CHAINTREUIL (G.),
Mlle HURE (A.)

Conservateur, chargé de la direction
de la Bibliothèque M. le Docteur HAHN (A.)

Conservateurs Mlles DUMAITRE (P.),
GOICHON (A.M.)

Bibliothécaires Mme CONTET (J.)
Mlles LAURENT (H.),
LE NOIR (G.),
QUIEVREUX (E.)

Par délibération en date du 9 Décembre 1798,
l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les
dissertations qui lui seront présentées, doivent
être considérées comme propres à leurs auteurs et
qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni
improbation.

A MES PARENTS

Qu'ils trouvent ici le gage
de ma profonde reconnais-
sance et de mon amour filial.

A MA FEMME

Dont l'aide et le soutien
m'ont été si précieux.

A LA MEMOIRE DE MA SOEUR

A MON FRÈRE

A TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS

A MONSIEUR LE PROFESSEUR A. DOGNON

Professeur de Physique médicale
à la Faculté de Médecine de Paris

Membre de l'Académie de Médecine

Officier de la Légion d'Honneur

Que je remercie vivement de
la confiance qu'il a bien
voulu m'accorder en accep-
tant de me prendre dans son
laboratoire.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR A. DJOURNO

Professeur d'Electrophysiologie
à la Faculté de Médecine de Paris.

A NOTRE PRÉSIDENT DE THÈSE

MONSIEUR LE PROFESSEUR L. COUGEROT

Professeur à la Faculté de Médecine de Paris.

Mon cher Maître,

Vous avez inspiré cette étude et m'avez donné les moyens de la mener à bien. Votre clairvoyance et votre vaste savoir ont été pour moi les guides les plus sûrs. Vous me faites maintenant l'honneur de présider mon jury de thèse. J'espère ne pas trop vous décevoir et je vous prie d'agréer, avec mes remerciements, l'expression de ma profonde gratitude et de ma très grande admiration.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR C. KELLERSHOHN

Maître de conférence Agrégé
en Physique médicale.

Mon cher Maître,

Vous m'avez fait l'honneur de m'accepter comme assistant et votre paternelle bienveillance a su guider mes premiers pas dans le domaine de la recherche scientifique. Il m'a été donné de connaître vos immenses qualités de coeur et d'esprit qui ont rendu particulièrement agréables et si profitables les journées passées sous votre égide.

Vous me faites l'honneur de siéger dans mon jury de thèse : merci pour tout ce que vous faites pour moi. Puisse cette thèse être le gage de ma très respectueuse amitié et de ma profonde admiration.

A MES MAÎTRES

DE LA FACULTE ET DES HÔPITAUX DE PARIS

AU DOCTEUR LACOURBE

Médecin Directeur de l'Hôpital Universitaire

Dont les soins m'ont permis de
poursuivre mes études.

AU DOCTEUR L.P. AUJOLAT

(Ancien Ministre)

Aux Chefs de Travaux de la Faculté :

Docteur J. CHANTEUR

Docteur Y. SIMONOT

Docteur J. VALEYRE

Médecin Chef
du Sanatorium Villemin

A mon Ami le Docteur R. ALFIERI

F.F. Chef de Travaux
à l'Ecole de Médecine de Clermont-Ferrand.

A MES COLLÈGUES
DE LABORATOIRE ET DU SANATORIUM

AU PERSONNEL DU LABORATOIRE

A TOUS CEUX
QUI ONT BIEN VOULU ME SERVIR D'OBSERVATEURS

Avec mes remerciements.

CHAPITRE I

CONSIDERATIONS GENERALES.

BUT DE NOTRE ETUDE.

INTRODUCTION

Alors que nos perceptions résultent, pour la plupart, d'une combinaison harmonieuse des renseignements fournis par nos différents organes des sens, les notions de luminosité et de couleur ne nous viennent que de la vue. La couleur, en particulier, est une donnée "spécifiquement visuelle" qui, constamment projetée sur le réel, "s'intègre mal dans une représentation cohérente du monde extérieur". Elle a, de ce fait, inspiré une somme considérable de travaux et, dans le cadre de l'optique physiologique, de multiples et ingénieuses théories ont tenté d'expliquer la vision colorée.

De la multiplicité même de ces recherches, il résulte qu'on a été amené à forger, dans ce domaine de la connaissance, un vocabulaire très particulier. Le non spécialiste, peu familiarisé avec les termes que nous emploierons, pourrait, par conséquent, être rebuté et la lecture de notre travail risquerait de lui paraître extrêmement fastidieuse. C'est pour pallier cet inconvénient que nous avons tenu à résumer, ici, quelques acquis nécessaires à la compréhension de notre exposé. Nous nous en excusons auprès

de nos maîtres et de nos juges, car une telle tentative présente toujours un caractère de sécheresse et ne peut jamais satisfaire ceux qui dominent de très haut ces questions.

Avant donc de parler du but que nous nous proposons d'atteindre lorsque nous avons entrepris les recherches qui feront l'objet des développements ultérieurs, nous allons rappeler, le plus brièvement possible, quelques notions essentielles.

LONGUEUR D'ONDE - LUMINANCE

Il est bien connu que deux sensations de lumières peuvent différer l'une de l'autre :

- soit par leur couleur : il s'agit d'un caractère qualitatif,

- soit par leur intensité : il s'agit d'un caractère quantitatif.

Sur le plan qualitatif, on peut admettre avec NEWTON qu'il y a sept couleurs spectrales qui sont, d'une extrémité à l'autre du spectre : le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé et le rouge. On discute encore de la réalité de l'indigo, mais il est plus important de noter que toutes les couleurs perçues par l'oeil ne sont pas représentées dans le spectre : c'est le cas des pourpres et des couleurs rabattues comme les marrons, les roses, etc.

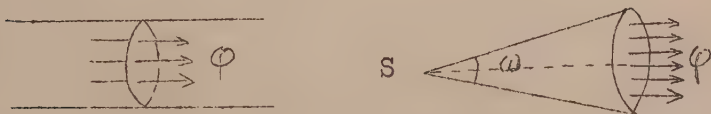
Depuis EULER, on a coutume de préciser la couleur d'un rayonnement par sa longueur d'onde exprimée en millionième de millimètre ou millimicron ($m\mu$). Les couleurs spectrales violettes ont des longueurs d'onde supérieures ou égales à 400 $m\mu$, tandis que les couleurs rouges, situées à l'autre extrémité du spectre, ont des longueurs d'onde inférieures ou égales à 750 $m\mu$. Toutes les couleurs spectrales visi-

bles se situent donc, en moyenne, entre 400 et 750 μ , c'est-à-dire dans un domaine extrêmement restreint de longueurs d'onde.

Sur le plan quantitatif, la radiométrie, se fondant sur le fait que les rayonnements, quels qu'ils soient, transportent de l'énergie, définit leur intensité par l'énergie véhiculée. Plus précisément, on appelle flux énergétique d'un rayonnement, la quantité d'énergie transportée par unité de temps par le faisceau (Cf. Fig.). On appelle intensité énergétique d'une source S, dans une direction déterminée, le flux d'énergie transporté par unité d'angle solide autour de cette direction. Si ω est cet angle solide et φ le flux qui traverse la section droite du faisceau (Cf. Fig.), l'intensité I est définie comme la limite du rapport $\frac{\varphi}{\omega}$ quand ω tend vers zéro, ce qui s'écrit :

$$I = \frac{d\varphi}{d\omega}$$

Les grandeurs précédentes, valables pour tous les rayonnements, sont déterminées à partir de récepteurs non sélectifs, c'est-à-dire dont la sensibilité est indépendante de la longueur d'onde.

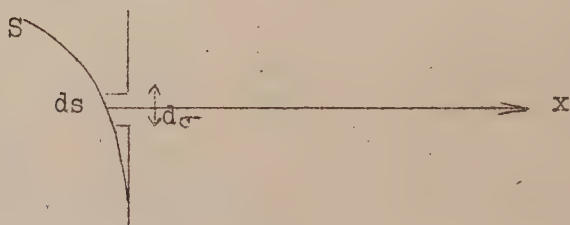


Le fait que des lumières de longueur d'onde extérieures à l'intervalle 400-750 μ ne nous soient pas perceptibles, montre que l'oeil est un récepteur sélectif. Ce récepteur particulier est très utilisé pour effectuer des mesures photométriques et il faut évidemment tenir compte, pour éviter de grossières erreurs, des caractéristiques qui lui sont propres. C'est la raison pour laquelle, en photométrie visuelle, on a été amené à définir, non plus des grandeurs

énergétiques, mais des grandeurs lumineuses.

La notion photométrique essentielle, celle qui est à la base des unités lumineuses, est la notion de luminance. La luminance est la donnée qui caractérise l'aspect plus ou moins lumineux d'une source non ponctuelle et se définit mathématiquement par la relation :

$$B = \frac{dI}{d\sigma}$$



où dI représente l'intensité lumineuse d'un élément de surface $d\sigma$ normal à la direction d'observation x . Elle exprime donc une intensité par unité de surface et se mesure en nits (nombre de bougies par mètre carré) ou en stilbs (nombre de bougies par centimètre carré).

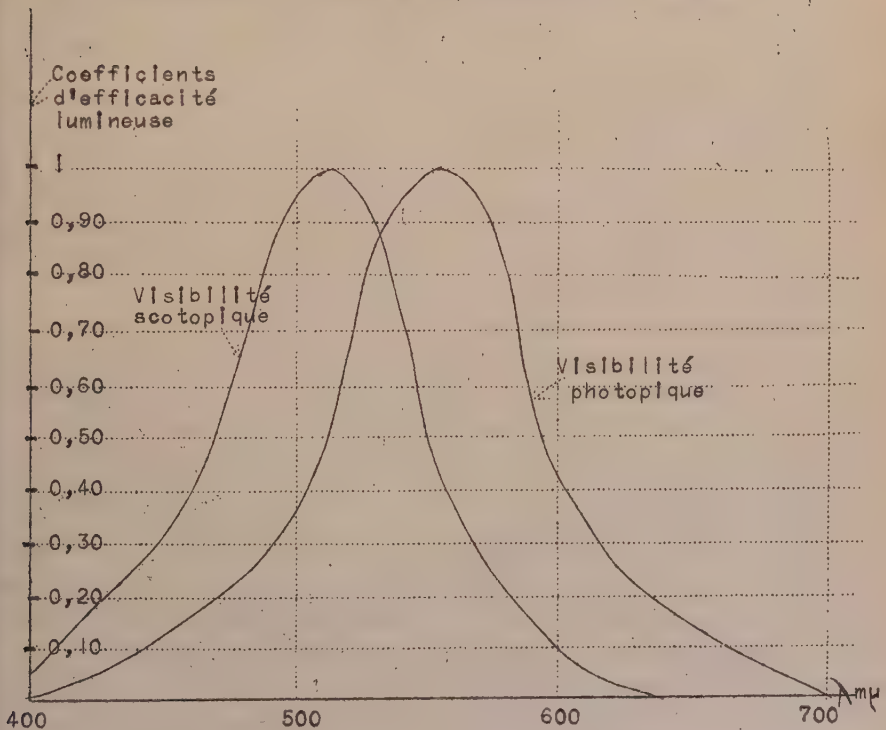
Importance de ces notions

Pour montrer l'intérêt de ces notions, et en particulier de celle de luminance, nous rappellerons seulement les données qui nous semblent nécessaires à la compréhension de notre travail.

Vision photopique et vision scotopique

Le physiologiste PURKINJE a constaté, lorsque le jour commence à poindre, que le bleu lui paraît

sait plus lumineux que le rouge. Il précise que la couleur bleue est la première qu'il puisse distinguer à cette basse luminance, correspondant à peu près à la clarté crépusculaire. On savait, par ailleurs, qu'en vision diurne, l'oeil est beaucoup plus sensible à des lumières qui se situeraient dans le vert-jaune. On en a, par conséquent, déduit que la sensibilité de l'oeil variait avec la luminance et on a appelé vision photopique la vision qui correspondrait à l'éclairage diurne, c'est-à-dire aux fortes luminances. De la même manière, on a défini la vision scotopique comme celle correspondant à la clarté crépusculaire, c'est-à-dire aux faibles luminances. La traduction exacte de cette différence se trouve dans ce qu'on appelle les courbes d'efficacité lumineuse photopique et scotopique. Nous donnons ces courbes, pour que le lecteur puisse constater, du premier coup d'oeil, que la sensibilité maxima de l'oeil se décale, en effet, de 42 mμ vers l'extrémité violette du spectre, quand on passe de l'éclairage diurne à l'éclairage nocturne.



Seuils absolus de luminance

Nous signalons cette étude des seuils parce qu'elle nous permettra de définir ce qu'on appelle intervalle photochromatique. Le seuil absolu est la plus petite énergie nécessaire à l'oeil pour qu'il puisse détecter la présence d'un stimulus lumineux : il correspond au "minimum perceptible (qu'il ne faut pas confondre avec le minimum séparable)".

On établit des courbes de seuils absolus le long du spectre, en évaluant ce minimum perceptible pour divers rayonnements monochromatiques visibles, observés sous un champ préalablement déterminé. Cependant, la valeur du seuil absolu dépend, entre autres paramètres, de la région rétinienne éclairée. C'est la raison pour laquelle WALD a établi la courbe des seuils absolus de luminance, après adaptation à l'obscurité, d'une part lorsque, seule, la fovéa est soumise à l'excitation du stimulus lumineux, d'autre part, lorsque c'est la rétine périphérique qui, seule, est stimulée. Ces courbes sont données en coordonnées semi-logarithmiques parce que la valeur du seuil varie beaucoup d'une longueur d'onde à l'autre. (Cf. Y. LEGRAND, Tome 2, page 255, fig.67).

L'inverse de la valeur du seuil absolu caractérise la sensibilité de l'oeil pour un rayonnement monochromatique donné : plus le niveau énergétique seuil est bas, plus l'oeil est sensible. On doit, en principe, retrouver par la technique des seuils absolus les courbes d'efficacité lumineuse ci-dessus. C'est, en effet, ce qui se produit, et on observe une correspondance satisfaisante entre les tracés des seuils et les courbes d'efficacité lumineuse, si l'on a soin d'établir celles-ci en coordonnées semi-logarithmiques et de les placer "la tête en bas". La courbe des seuils, établie en vision fovéale, correspond, alors, à la courbe d'efficacité lumineuse obtenue en vision photopique. De même, les seuils absolus, en vision latérale, répondent à peu près à la sensibilité du récepteur visuel, en vision scotopique.

Si l'on remarque que, dans la fovéa, prédominent de manière écrasante des cellules visuelles particulières appelées cônes rétinien, tandis qu'à la périphérie de la rétine domine un autre type de cellules visuelles, les bâtonnets, on peut supposer que l'homme possède deux rétines imbriquées l'une dans l'autre. La rétine à cônes est une rétine diurne dont la sensibilité est donnée par la courbe d'efficacité lumineuse établie en vision photopique et est responsable des sensations colorées. La rétine à bâtonnets est une rétine nocturne dont la sensibilité, qui croît à mesure que se prolonge l'adaptation à l'obscurité, est donnée par la courbe d'efficacité lumineuse en vision scotopique et est responsable de la sensation achromatique obtenue en basse luminance.

On constate, en effet, comme le dit la théorie de la dualité rétinienne exposée ci-dessus, que le seuil latéral correspond, à peu près toujours, à une sensation de lumière dénuée de couleur, alors que le seuil fovéal répond toujours à une sensation colorée. Et on appelle intervalle photochromatique le rapport entre le seuil chromatique et le seuil incolore. Ce rapport dépasse 100 pour les longueurs d'onde inférieures à 550 m μ et tombe à 10 vers 600 m μ .

Phénomène de BEZOLD-BRÜCKE

: Si, placé à des niveaux photopiques, nous augmentons la luminance dans des proportions considérables, nous constatons que la couleur préalablement perçue change de teinte : les rouges et certains verts jaunissent, les violets et d'autres verts bleuissent. Il y a donc, dans le spectre, trois points dont la teinte ne varie pas lorsque la luminance croît ; ce sont : un point dans le bleu, un point dans le jaune et le point vert séparant les domaines verts à tendance contraire. Ces points se situent, en moyenne, autour de 474 m μ pour le bleu, de 506 m μ pour le vert et de 571 m μ pour le jaune. Les nuances des couleurs spectrales sont

donc moins bien fixées par leur repérage en longueur d'onde qu'on pourrait le penser a priori. Il en résulte que la longueur d'onde n'est pas le seul paramètre entrant en jeu dans la qualification d'une couleur et la luminance en est un deuxième parmi d'autres.

Couleurs unitonales

Si, maintenant, au lieu de considérer comme précédemment des lumières de longueur d'onde déterminée en faisant varier la luminance, nous adoptons le protocole expérimental opposé, nous sommes amené à définir la notion de couleur unitonale.

Lorsqu'on recherche, en effet, le plus petit écart, $\Delta \lambda$, de longueur d'onde qui, à luminance constante, permet à l'oeil de différencier deux couleurs, on constate que ce seuil différentiel est extrêmement variable le long du spectre. Cependant, les écarts $\Delta \lambda$ nécessaires sont, dans l'ensemble, plus petits dans la partie moyenne du spectre qu'à ses extrémités. Dans la région violette et surtout dans la région rouge, à partir de 680 m μ la tonalité ne change pratiquement pas, et ces régions sont appelées zones unitonales. Le domaine des longueurs d'onde correspondant à la couleur verte est, de ce point de vue, un domaine intermédiaire, et les plus petites valeurs de $\Delta \lambda$ se rencontrent lors du passage du bleu au vert d'une part, du jaune à l'orangé d'autre part.

TRIVARIANCE VISUELLE

Il s'agit là d'une propriété caractéristique du récepteur visuel que nous pourrions exposer facilement, grâce encore aux notions de luminance et de longueur d'onde.

Considérons, en effet, deux radiations mono-

chromatiques de longueur d'onde λ_1 et λ_2 , de luminance B_1 et B_2 . L'aspect résultant de la superposition de ces deux lumières colorées peut être exactement reproduit par la superposition d'une lumière blanche de luminance B_w et d'une lumière spectrale de longueur d'onde λ , de luminance convenablement choisie B_λ . Ce fait expérimental, et absolument général, se représente par l'identité colorimétrique

$$B_1 + B_2 \equiv B_w + B_\lambda$$

où λ se nomme la longueur d'onde dominante du mélange coloré.

Si nous considérons le premier membre de cette identité, il possède la variance 4, puisqu'il est défini par les quatre grandeurs indépendantes que sont les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 et les luminances B_1 et B_2 . Par contre, le deuxième membre n'a plus que la variance 3, puisque les variables qui le caractérisent sont respectivement B_w , λ et B_λ . C'est cette réduction à 3, par le récepteur visuel, du nombre de paramètres nécessaires à l'oeil pour apprécier les lumières, qui constitue le fait expérimental de la trivariance visuelle.

De cette propriété caractéristique résultent toutes les lois linéaires de la colorimétrie et, pour reproduire la tonalité λ d'une couleur quelconque, il suffira de mélanger en proportions convenables au moins trois lumières monochromatiques, qu'on appelle les primaires colorimétriques. Le choix de ces primaires est arbitraire, mais elles doivent être telles que le mélange de deux d'entre elles ne donne jamais de blanc.

BREF APERÇU DE LA THEORIE TRICHRMATIQUE

Notre but n'est pas, par ce chapitre, de donner un répertoire complet des diverses théories qui ont vu le jour, mais simplement d'introduire notre

travail. Aussi, passerons-nous rapidement sur la théorie de HERING, bien qu'actuellement elle semble avoir un regain de faveur. Nous n'insisterons pas davantage sur les perfectionnements apportés à la théorie trichromatique par des auteurs comme PIERON, GRANIT, LE GROS CLARK, LADD FRANKLIN, SEGAL, pour ne citer qu'eux. Nous exposerons seulement, le plus brièvement possible, la théorie de YOUNG-HELMHOLTZ.

Cette théorie revient à penser qu'un certain choix de primaires colorimétriques correspond physiologiquement aux primaires colorimétriques de l'oeil que DONDERS nomme fondamentales. A partir donc de trois couleurs fondamentales, l'oeil est capable de percevoir toutes les teintes qui existent dans la nature. Le problème est, par conséquent, de déterminer ces primaires physiologiques pour tenter de rendre compte, tant des propriétés normales que des affections pathologiques qui peuvent toucher la vision colorée.

C'est à cette tâche que se sont consacrés des esprits comme KÖNIG, JUDD, FICK, PITT, WRIGHT, STILES, etc... Nous ne développerons pas les travaux de ces différents auteurs, mais nous signalerons, cependant, le point de départ de leurs recherches et l'ensemble des résultats obtenus.

DETERMINATION DES FONDAMENTALES

KÖNIG, puis, plus récemment, JUDD, partant de l'idée que le dichromatisme (maladie dont était affecté DALTON), est dû à la suppression d'une fondamentale, ont admis comme primaires colorimétriques de l'oeil les couleurs suivantes : un rouge un peu pourpre très voisin de l'extrémité du spectre, un vert bleuté et un pourpre très voisin de l'extrémité violette du spectre. Les deux premières couleurs correspondraient respectivement aux centres de confusion des protanopes et des deutéranopes. La rare-

té de la tritanopie, par ailleurs, explique que la fondamentale de courte longueur d'onde ait été déterminée approximativement.

Soulignons que ces couleurs sont dépourvues d'existence physique et sont dites virtuelles ou irréelles. En effet, toute lumière colorée, pour être perçue par l'oeil, nécessite la réponse d'au moins deux fondamentales. Cependant, de nombreux auteurs pensent, qu'au seuil chromatique, la réponse d'une de ces deux fondamentales peut être infra-liminaire. On pourrait alors, en se plaçant à de tels niveaux de luminance, percevoir la sensation colorée correspondant à l'excitation d'une seule fondamentale.

FICK et PITT, interprétant la deutéranopie, non plus comme la suppression d'une fondamentale, mais comme la fusion des primaires rouge et verte, parviennent, après quelques modifications, aux couleurs virtuelles suivantes : la première fondamentale se confond avec l'extrémité rouge du spectre ; la deuxième est un vert dont la tonalité est 507 m μ , la troisième à une longueur d'onde dominante de 435 m μ .

Ces fondamentales type Fick semblent avoir des avantages certains sur les fondamentales type König. En effet, elles expliquent bien que les dichromates voient dans le spectre les deux seules couleurs jaunes et bleues. Elles sont satisfaisantes du point de vue psychologique, puisque la couleur bleue et la couleur verte sont des couleurs psychologiquement simples. Rappelons, à ce propos, qu'on appelle couleurs psychologiquement simples, les couleurs qui ne semblent pas résulter d'un mélange de deux autres couleurs. C'est le cas, en particulier, du jaune et du bleu, alors que le violet, par exemple, semble dû, pour la plupart des sujets, à un mélange de rouge et de bleu. Notons, par ailleurs, que ces fondamentales sont moins modifiées par l'effet Bezold-Brücke que les fondamentales de König. Mais il faut, cependant, reconnaître que l'hypothèse de KÖNIG rend plus aisée

l'interprétation des anomalies du trichromatisme.

WRIGHT et WALTER, eux, ont tenté de déterminer les fondamentales, non plus à partir des interprétations du dichromatisme, mais à partir des effets de l'adaptation colorée. Ils admettent que la tonalité des fondamentales doit rester identique après adaptation colorée et montrent que les stimuli correspondant à ces fondamentales sont nécessairement irréels. Ils aboutissent, aussi, à un bleu voisin de 460 mμ, et, malgré la dispersion considérable de leurs résultats, à des points qui encadrent les fondamentales rouge et verte de PITT. Cependant, WRIGHT lui-même a reconnu que certaines imperfections vicient sa méthode pour la détermination de la fondamentale de courte longueur d'onde.

STILES, par une méthode ingénieuse "à la fois de seuil différentiel de luminance et de couleur", a trouvé une fondamentale de courte longueur d'onde, intermédiaire entre celle de KÖNIG et celle de FICK.

L'accord est donc pratiquement réalisé en ce qui concerne les fondamentales rouge et verte. Par contre, en ce qui concerne la fondamentale de courte longueur d'onde, les uns pensent qu'elle est violette (KÖNIG, JUDD), les autres, et ce sont les plus nombreux, la situent dans le bleu. Le travail de GÖTHLIN, que nous allons maintenant exposer, semble avoir fait pencher considérablement la balance en faveur d'une fondamentale bleue.

Les recherches de GÖTHLIN

Elles ont porté sur la détermination physiologique de cette troisième fondamentale. Les résultats de cette étude ont été publiés en 1944, dans le Journal of the Optical Society of America (Cf. Bibliographie). En guettant, chez cinq sujets normaux, l'apparition de la sensation colorée à la fin de l'intervalle photochromatique, GÖTHLIN, admettant,

comme beaucoup d'auteurs, qu'au seuil chromatique, chacune des fondamentales est seule excitée dans la région du spectre correspondant à sa tonalité, donnait une méthode de détermination de ces fondamentales. Il soumettait ses sujets à l'action de stimuli monochromatiques de longueurs d'onde comprises entre 430 et 455 mμ, c'est-à-dire situés dans la région indigo du spectre. L'expérimentation se faisait sous un champ de 3° ou de 45 minutes, en vision centrale, et après adaptation d'une heure à l'obscurité. A ces niveaux liminaires, avant toute sensation d'indigo, la radiation monochromatique éveille, selon lui, une sensation bleutée. Il en conclut que le bleu est la fondamentale de courte longueur d'onde.

Cette conclusion s'oppose à la théorie de SEGAL, qui ne peut expliquer le phénomène de Bezold-Brücke qu'en admettant une fondamentale violette. Par ailleurs, SEGAL, dans la région indigo du spectre, pense que certains sujets excitent plus particulièrement cette fondamentale violette. Il y a donc une contradiction entre les dires de ces deux auteurs, et cette contradiction pose à nouveau le problème de la détermination de la fondamentale de courte longueur d'onde.

Nous avons voulu tenter d'éclaircir ce point litigieux en reprenant le travail de GÖTHLIN sur une plus grande échelle, et ce sont les résultats de cette étude que nous allons développer dans notre thèse.

BUT DE NOTRE ETUDE

C'est, en effet, à partir de ces constatations que nous avons pensé pouvoir apporter quelques éclaircissements sur la question intéressante de la troisième fondamentale.

A notre avis, en effet, une étude statistique

des réponses du plus grand nombre de sujets normaux possible , dans toute la région des courtes longueurs d'onde, du violet (415 mμ) au vert extrême, s'impose maintenant. Cependant, nous avons voulu déborder le cadre restreint de la détermination d'une seule fondamentale et vérifier le bien-fondé de l'hypothèse de GÖTHLIN en essayant de déterminer, par sa méthode, les deux autres fondamentales déjà connues.

Par ailleurs, nous avons systématiquement enregistré les réponses colorées de nos observateurs pour des niveaux franchement photopiques, afin de pouvoir, le cas échéant, comparer les distributions liminaires aux distributions photopiques.

CH A P I T R E I I

MONTAGE EXPERIMENTAL

I N T R O D U C T I O N

Notre but a été de faire une étude des réponses du plus grand nombre d'observateurs possible soumis à une gamme de rayonnements monochromatiques. Nous envisagions la statistique des résultats obtenus en vision franchement photopique et à la fin de l'intervalle photochromatique, pour savoir :

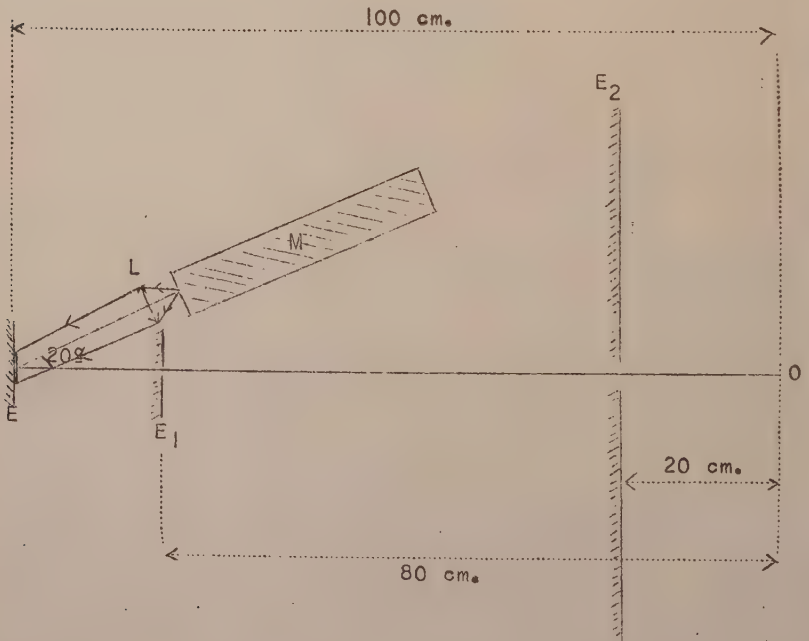
- d'une part, comment interpréter les distributions expérimentales ;
- d'autre part, si les mêmes lois statistiques régissaient les réponses photopiques et juste-supraliminales ;
- enfin, au cas où des différences statistiquement significatives apparaîtraient entre ces deux types de réponses, quelles interprétations permettraient de les expliquer au mieux.

Pour un tel travail, l'idéal aurait été un appareil du genre limino-spectroscope de Göthlin, permettant de "régler de façon extrêmement fine l'énergie lumineuse frappant l'oeil". Ne disposant pas d'un instrument semblable, nous avons opté pour une méthode plus qualitative et imaginé le montage suivant :

Sur un banc d'optique sont placés respectivement, comme le montre la figure ci-dessous :

- un écran plan E,
- deux écrans E_1 et E_2 , percés chacun d'un orifice circulaire,
- une mentonnière réglable O.

Un monochromateur M fournit un faisceau coloré qu'une lentille convergente L concentre légèrement sur l'écran E. De cette manière, la plage colorée, formée par l'intersection du faisceau monochromatique et du plan E, joue, pour l'observateur dont l'oeil est placé en O, le rôle de source secondaire de lumière.



Pour que l'exposé gagne en clarté, nous étudierons successivement :

- les caractéristiques du monochromateur,
- son dispositif d'alimentation,
- les autres organes optiques du montage.

°
° °

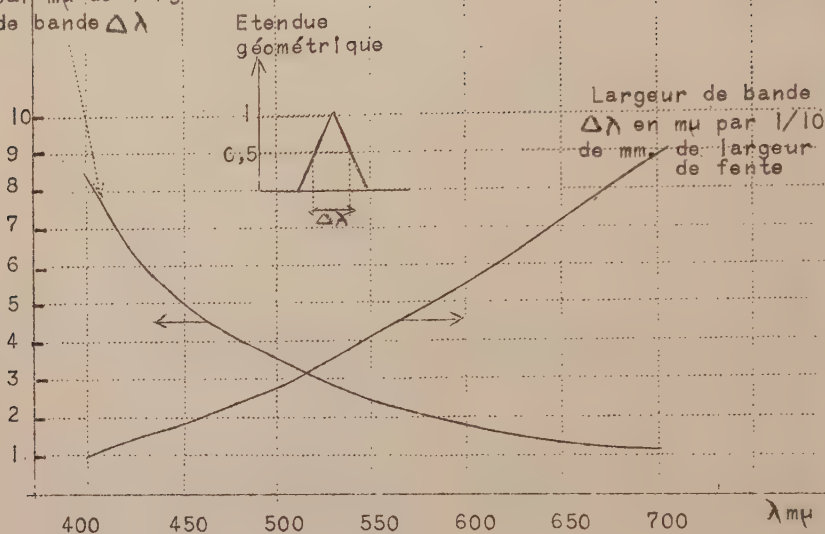
CARACTERISTIQUES DU MONOCHROMATEUR

Nous avons utilisé le petit monochromateur autocollimateur Desvignes, fabriqué par les usines "Physique et Industrie" d'Aubervilliers (Seine). Il s'agit d'un monochromateur simple, équipé pour le visible et transmettant un flux relativement intense. Le rayon de courbure de ses fentes d'entrée et de sortie est de 122 mm., et les rayonnements émis sont compris dans une étroite bande spectrale. Le constructeur nous a fourni la courbe des largeurs de bandes que nous reproduisons ci-dessous, et nous avons travaillé, au cours de nos observations, avec des largeurs de fentes telles que la largeur de bande soit toujours approximativement de 10 mμ (Cf. Tableau).

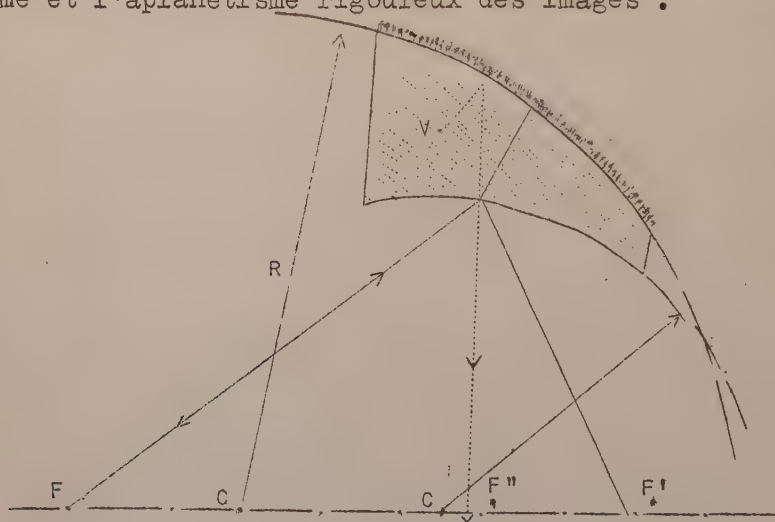
Un des problèmes les plus difficiles à résoudre est celui de la lumière diffusée parasite, donnée par les monochromateurs simples. Le constructeur assure que son appareil donne 10 à 20 fois moins de lumière diffusée que les monochromateurs auto-collimateurs ordinaires, et s'exprime ainsi :

"Dans le monochromateur Desvignes, les images parasites existent, mais se forment très loin des fentes et ne peuvent être mêlées au flux monochromatique. En effet, les réflexions donnent deux images : la première en F' conjuguée de F dans le miroir,

Largeur des fentes
en $1/100$ de mm.
par $m\mu$ de largeur
de bande $\Delta\lambda$



la seconde en F'' conjuguée de F' dans le dioptré (Cf. figure). Ce dernier rayonnement peut, soit émerger du système en convergeant, soit se perdre en V dans la lentille... Toutes les surfaces rencontrées sont utilisées dans des conditions assurant le stigmatisme et l'aplanétisme rigoureux des images".



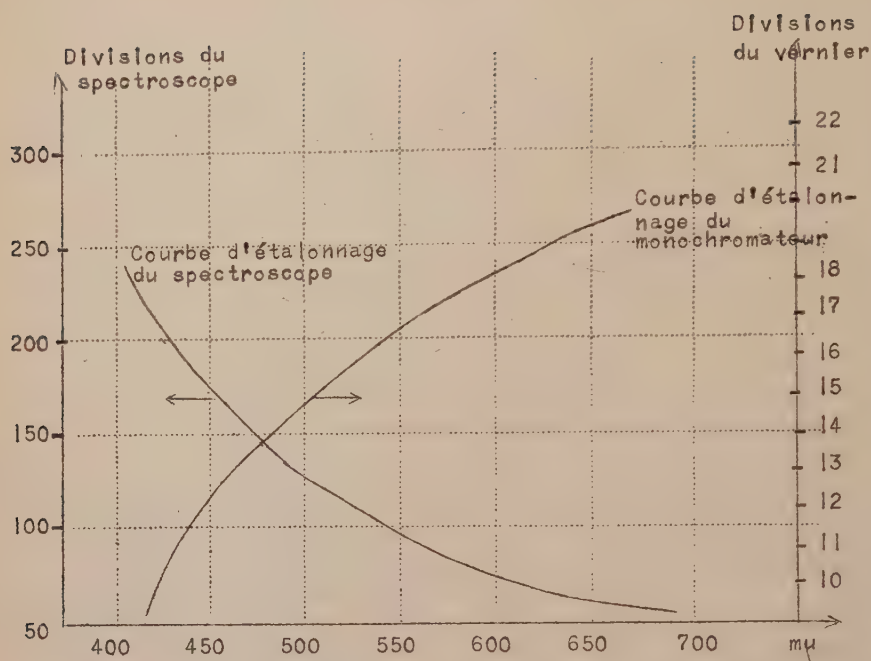
Pour tracer la courbe d'étalonnage de l'appareil, nous nous sommes servi d'une lampe à vapeur de mercure à moyenne pression. Dans un premier temps, nous étalonnions un spectroscope à vision directe sur les raies de mercure. Dans un deuxième temps, nous faisons correspondre les longueurs d'onde données par le monochromateur aux divisions du spectroscope, pour une bande passante de 10 mμ. Le tableau suivant donne les résultats de cette manipulation. Les chiffres qui y figurent pour le vernier représentent les valeurs moyennes de 5 mesures faites à des jours différents.

Lampe à vapeur de mercure	Longueurs d'onde en mμ	Divisions du spectros- cope	Largeur de fente du mono- chromateur	Divisions du vernier du mono- chromateur
Raies violettées	404	240	79/100	8,40
Raie bleue	436	190	55/100	11,18
Raie vert chou	492	134	35/100	14,50
Raie verte	546	100	25/100	16,55
Raies jaunes	578	86	20/100	17,60

Nous estimons l'erreur commise au cours de ces mesures à ± 3 mμ, pour la région du spectre inférieure à 578 mμ. Au-delà des raies jaunes du mercure, en effet, des difficultés expérimentales nous ont obligé à extrapoler la courbe d'étalonnage du spectroscope suivant la relation :

$$x = a + \frac{b}{\lambda^2}.$$

Dans cette relation, x représente l'étalement du

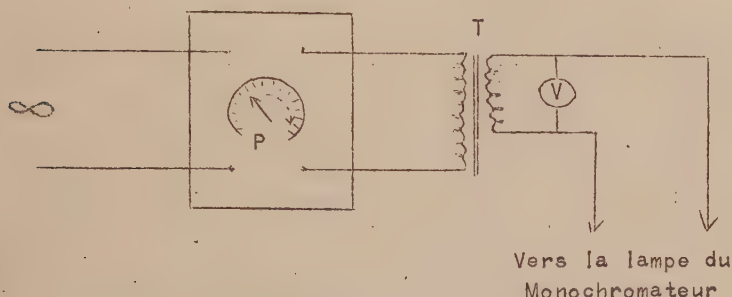


spectre, λ la longueur d'onde, a et b deux constantes que nous avons évaluées à partir des résultats expérimentaux obtenus dans les courtes longueurs d'onde. Par conséquent, il nous semble permis de penser que les erreurs d'étalonnage dans la région des grandes longueurs d'onde sont plus importantes (Voir les courbes ci-dessus).

DISPOSITIF D'ALIMENTATION DU MONOCHROMATEUR

Il est constitué d'une source de tension alternative de 127 volts efficaces qui était stable au cours des expériences. Cette source de courant débite sur un autotransformateur P (alternostat S.A.F.A. R.E.) gradué de 0 à 150 et relié au primaire d'un transformateur abaisseur de tension T. Le secondaire de ce transformateur alimente l'ampoule du mono-

chromateur (lampe Mazda 6 volts, 10 ampères) ; un voltmètre V est branché en permanence aux bornes du secondaire basse tension.



AUTRES ORGANES OPTIQUES DU MONTAGE

Ce sont la lentille L, les 3 écrans E, E₁ et E₂, la mentonnière O et les dispositifs de protection contre la lumière diffusée.

En recourant à la lentille convergente L, nous avons l'intention de faire tomber sur l'écran E un faisceau de rayons parallèles. Cependant, la faible luminosité de la plage colorée obtenue par cette méthode nous a conduit à préférer un faisceau légèrement convergent. Le grand axe de l'ellipse formée par l'intersection du faisceau monochromatique et du plan E mesure 7,5 cm. et son petit axe environ 7 cm.

Les rayonnements utilisés ayant une largeur de bande de 10 mμ, nous ne sommes pas à l'abri des phénomènes d'irisation. En fait, ces irisations sont minimales, la plage colorée est relativement homogène avec une très légère différence de teinte sur les bords. Nous pensons pouvoir les considérer comme négligeables, et ceci d'autant plus que le diaphragme de champ E₁ permet presque toujours de les élimi-

ner, au cas où elles seraient perçues.

L'écran E, situé à un mètre de l'observateur O, est une surface d'aluminium, plane et lisse, de 10 cm², vernie par un vernis incolore et recouverte d'une manière homogène par deux couches d'oxyde de magnésie. Nous avons spécialement choisi l'oxyde de magnésie parce qu'il constitue un diffuseur pratiquement parfait, son facteur de réflexion diffuse atteignant 0,95.

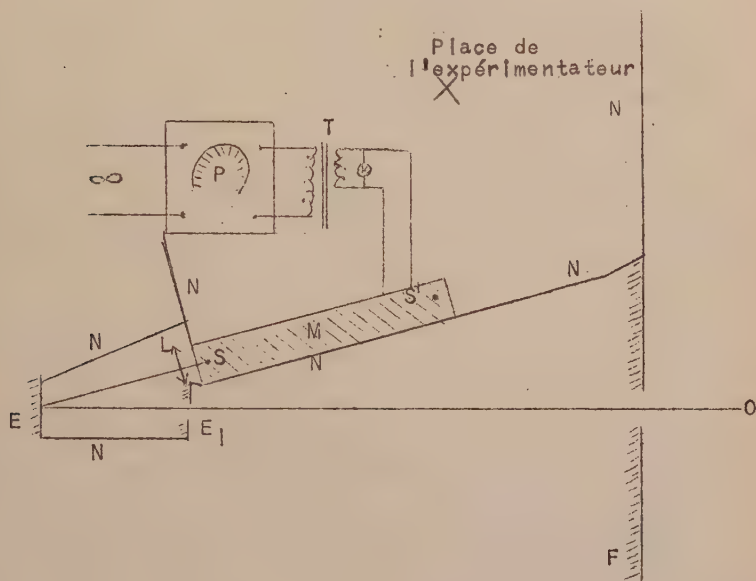
L'écran E₁, situé à 80 cm. de l'observateur et percé d'un orifice circulaire de 3 cm. de diamètre, détermine un champ de 2°. Il a, en outre, l'avantage de donner à la plage colorée un aspect immatériel, réalisant ainsi ce que "les Américains désignent sous le nom de couleur film, par opposition aux couleurs de surface qui caractérisent les objets". Cet écran a été préalablement verni et peint en noir sur les deux faces.

L'écran E₂ sert encore à délimiter le champ par son ouverture circulaire de 3 cm. de diamètre. Cependant, il réalise surtout une protection contre la lumière diffusée qui proviendrait de la lampe S' (Cf. schéma), nécessaire à l'expérimentateur pour effectuer les réglages et prendre note des réponses du sujet observé. Il est de dimensions beaucoup plus grandes et complètement peint en noir sur ses deux faces.

La mentonnière O, réglable suivant l'axe horizontal et l'axe vertical, qui déterminent le plan frontal, permet au sujet d'observer la plage lumineuse avec l'oeil qu'il juge le meilleur.

Les dispositifs de protection contre la lumière diffusée sont multiples. Ils ont été réalisés à l'aide de papiers entièrement noirs qui relient en tunnel, suivant les tracés N du schéma, les écrans E, E₁ et E₂, le monochromateur et le "potentiomètre". Les sources de lumière S et S' sont plus particulièrement protégées ; la source S', en particulier, ne

laisse sortir sa lumière que par un trou d'épingle.
L'expérimentateur se tient près du dispositif d'alimentation du monochromateur et l'écran E_2 est prolongé, lui aussi, par un rideau de papier noir.



CRITIQUE DU MONTAGE

Ce montage présente certaines imperfections. En effet, nous aurions pu imaginer de projeter, avec une lentille, sur la pupille de nos observateurs, le faisceau coloré provenant directement de notre monochromateur. C'est la technique que les Anglo-Saxons nomment "Maxwellian View". De cette manière, toute la surface de la lentille paraît lumineuse et nous pouvons disposer d'un flux très intense, compatible avec une étude précise des réponses en vision photographique.

Nous avons, cependant, préféré soumettre à l'appréciation de nos sujets une plage colorée qui constitue une source secondaire de lumière, et, par

conséquent, s'adapte mieux à une étude au seuil chromatique. Certes, ce choix ne nous permet pas de disposer de luminances suffisamment élevées, et nous avons été conduit, pour cette raison, à utiliser des largeurs de bande de 10 mμ. Pour la même raison, il nous a été impossible d'employer des filtres complémentaires permettant d'éliminer toute lumière diffusée parasite qui serait issue du monochromateur. Cependant, le dispositif était suffisant pour étudier ce qui se passe à la fin de l'intervalle photochromatique et en vision photopique. Ce que nous avons perdu en précision avec cet appareillage, nous pensons que nous l'avons gagné en simplicité, conformément à notre but qui était une étude statistique.

C H A P I T R E I I I

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

INTRODUCTION

1°)- Principe de la méthode.

L'expérimentation consiste à prendre un observateur sans anomalie de la vision colorée et à lui demander de nommer la première couleur qu'il perçoit quand, pour une longueur d'onde déterminée, on augmente très progressivement la luminance de la plage E. On lui demande, en outre, de préciser comment évolue sa sensation colorée jusqu'à ce qu'il ait largement dépassé le seuil chromatique. En effet, dans ce cas, la première réponse colorée correspond à un niveau liminaire qui se situe à la fin de l'intervalle photochromatique, et la dernière réponse obtenue est nettement supraliminaire. Pratiquement, on procède de la manière suivante :

Le sujet, préalablement adapté à l'obscurité pendant une vingtaine de minutes, regarde droit devant lui, tandis que l'expérimentateur, à l'aide de l'alternostat, élève progressivement (à partir de zéro) la tension d'alimentation du monochromateur.

A une certaine tension, l'observateur voit apparaître une lueur sans couleur ; nous avons atteint le seuil achromatique et la tension correspondante est notée. On continue alors à faire croî-

tre très progressivement la tension, en demandant au sujet de bien fixer le centre de la plage lumineuse pour que sa vision soit strictement centrale.

A un certain voltage, le sujet nomme sa sensation colorée ; nous sommes à la fin de l'intervalle photochromatique. On le reconnaît très facilement, car les réponses sont toujours tempérées du type "gris-violacé, gris-bleuté, gris-verdâtre, jaunâtre, rougeâtre, etc...". La couleur et la tension correspondante sont alors notées.

On continue ensuite à faire croître le voltage toujours très lentement et on note comment varie la première sensation colorée jusqu'à ce que la couleur nommée soit précise, du type "violet, bleu, vert..". On est, alors, au-dessus du seuil chromatique, et on le vérifie aisément parce qu'il n'y a pratiquement plus que de faibles variations de la réponse colorée avec la tension d'alimentation, qui est ainsi portée jusqu'à sa valeur maxima.

Notons qu'en procédant de cette manière, la luminance de la plage varie avec la tension. Or, celle-ci, en augmentant, fait croître la température du filament de la lampe et, par conséquent, la température de couleur de la source lumineuse. On pourrait, de ce fait, penser que la couleur de notre plage subit certaines variations. Il n'en est rien, puisque nous travaillons avec un rayonnement "monochromatique" défini par une largeur de bande constante. Quelle que soit, par conséquent, la courbe d'émissivité spectrale du filament de notre lampe aux diverses températures, la largeur de bande est un invariant. Les considérations suivant lesquelles, autour des valeurs normales, la température de couleur varie comme une puissance fractionnaire (puissance 0,37) du voltage, ne nous intéressent donc pas. Précisons, cependant, qu'il n'est pas dans notre but de déterminer la luminance de la source lors de chaque réponse et que les indications données par le voltmètre ne constituent, pour nous, qu'un système de repérage arbitraire et pratique.

2°)- L'étude pour chaque sujet a été faite en trois temps :

- Dans un premier temps, le sujet est testé pour savoir s'il peut être pris comme observateur.

- Dans un second temps, après adaptation suffisante à l'obscurité, il est soumis à l'expérience.

- Dans un troisième temps, il subit un interrogatoire "psychologique" où il lui est demandé de donner un jugement de valeur sur ses réponses.

= Pour qu'un sujet puisse servir d'observateur :

Nous exigeons qu'il ne soit pas astigmatique et qu'il ne présente aucun trouble de la vision des couleurs. Cependant, la myopie et l'hyperopie légère ne l'éliminent pas. C'est ainsi que 8 des observateurs retenus étaient porteurs d'un trouble de la dioptrique oculaire autre que l'astigmatisme patent.

Pour apprécier la vision colorée de chaque candidat à l'expérience, nous lui faisons défiler, après adaptation à l'obscurité de 10 minutes environ, tout le spectre visible à un niveau largement photopique. Nous lui demandons de nommer les couleurs qu'il voit et de tenter de saisir le passage d'une couleur à la suivante. Ceci a, en outre, l'avantage de lui montrer les couleurs spectrales et de l'habituer, en même temps, à l'aspect flottant des couleurs-film. Tout sujet, semblant présenter une anomalie au cours de cet examen sommaire et rapide, est aussitôt soumis aux tests en vue de l'éliminer.

Après ce préambule, qui n'occasionnait aucune fatigue oculaire, une nouvelle adaptation de 20 minutes à l'obscurité totale est exigée avant de commencer l'expérience.

Notons que, dans l'ensemble, nous avons pris

un échantillon de sujets jeunes dans une population au niveau intellectuel élevé. En effet, la grande majorité des observateurs était constituée par des étudiants de première année de médecine, auxquels s'ajoutaient 8 assistants au laboratoire de Physique, quelques médecins, pharmaciens, instituteurs, décorateurs, et deux professeurs de Faculté. Qu'il me soit permis, au passage, d'exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui n'ont pas hésité à sacrifier une partie de leur temps précieux pour me permettre de mener à bien cette étude statistique. Je leur en suis d'autant plus reconnaissant que, dans leurs réponses, ils ont apporté toute l'objectivité nécessaire et se sont efforcés de critiquer au mieux leurs dires pour m'aider à dissocier le physiologique du psychologique.

= Une fois l'adaptation à l'obscurité jugée suffisante, nous faisons apprécier au sujet une série de lumières colorées, disposées dans un ordre arbitraire, de façon à éviter tout groupement de longueurs d'onde voisines. Pour que le mode de classement choisi ne puisse avoir aucune influence sur les résultats de notre statistique, nous inversons cet ordre d'un observateur au suivant.

Les stimuli monochromatiques proposés sont distants les uns des autres, dans les courtes longueurs d'onde, de $10 \text{ m}\mu$, et les largeurs de fentes de notre monochromateur ont été calculées, dans tous les cas, pour que la largeur de bande soit, elle aussi, de $10 \text{ m}\mu$. Si nous n'avons pas gardé cette même distance entre les radiations monochromatiques de grandes longueurs d'onde, c'est que nous avons voulu éviter les phénomènes de fatigue. Dans l'extrémité rouge du spectre, en effet, nous nous sommes contenté de simples pointés avec des lumières de 590, 610, 630 et $660 \text{ m}\mu$. Il est arrivé par deux fois qu'un sujet signale sa lassitude ; dans ces deux cas, l'expérience a été arrêtée et reprise après vingt minutes de repos complet à l'obscurité.

Nous avons consigné, dans des tableaux du type ci-après, les réponses de chaque sujet. Les chiffres de la colonne "Seuil achromatique" et ceux placés à la droite des réponses colorées représentent la tension lue sur le voltmètre utilisé. Rappelons, à propos de ces niveaux exprimés en volts, que nous n'avons pas voulu construire une courbe valable des seuils achromatiques et chromatiques. Les indications recueillies par cet artifice nous permettent seulement de connaître l'ordre de grandeur de ces niveaux les uns par rapport aux autres.

On peut vérifier, sur un tel tableau, que la première réponse colorée est généralement précédée de l'épithète "gris" ou qualifiée par les observateurs de manière à faire saisir qu'il ne s'agit pas de couleur franche. Pour la commodité de l'exposé, nous supprimerons cette "épithète" dans ce qui suivra, mais nous demanderons au lecteur de se souvenir qu'à la fin de l'intervalle photochromatique, les réponses étaient toujours tempérées.

Notons, en outre, que nous nous sommes trouvé dans l'obligation de limiter le vocabulaire de nos sujets aux mots simples : violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge. En effet, certains observateurs, animés de très bonnes intentions, donnaient des qualificatifs du type "mer du sud, soleil couchant, émeraude", etc... Pour laisser, cependant, une certaine souplesse d'appréciation à nos sujets, nous avons accepté les mots composés : bleu-violet, bleu-vert, vert-jaune, jaune-orangé, rouge-orangé. Ces réponses semblent effectivement marquer des perceptions intermédiaires, et très souvent correspondent, à la fin de l'intervalle photochromatique, à une hésitation de l'observateur. Chaque fois que cela s'est avéré possible, nous avons demandé de préciser, pour ces couleurs intermédiaires, quelle était la couleur dominante. Dans nos relevés, cette dominante était alors toujours soulignée. Ainsi, pour une réponse bleu-violet avec plus de bleu que de violet, nous écrivions bleu-violet, et réciproquement bleu-violet lorsqu'il y avait plus de violet

Vernier du Mono- chromateur	Largeur de fente en mm.	λ_{μ}	Seuil achroma- tique	1ère réponse colorée	Réponse à la tension maxima
14,60	34/100	495	1,25	Gris-bleuté 3	Bleu-vert
18,85	15/100	630	1,25	Orangé 1,75	Rouge
15,05	32/100	505	1,25	Gr.-bleuté 2,25	Vert
10,30	62/100	425	2	Gr.-viol. 4,75	Violet
15,40	30/100	515	1,25	Jaun.-vert 2	Vert
19,35	13/100	660	1,50	Roug.-orangé 2	Rouge
13,15	43/100	465	1,50	Gris-bleu- violacé 3,75	Bleu-violet
18,40	17/100	610	1,25	Orangé 1,75	Rouge-orangé
15,80	28/100	525	1,25	Gris-bleu- 2 vert	Vert
13,70	40/100	475	1,25	Gr.-bleuté 2,5	Bleu
17,20	22/100	565	1,25	Jaunâtre 2,25	Vert-jaune
9,50	70/100	415	1,50	Gr.-viol. 4,75	Violet
16,85	23/100	555	1,25	Jaunâtre 2,25	Vert-jaune
12,50	47/100	455	1,25	Gr.-viol. 3,50	Violet-bleu
14,20	37/100	485	1,25	Gr.-bleu- vert 3,25	Bleu-vert
16,20	26/100	535	1,25	Gr.-vert- jaune 2,75	Vert
11,10	56/100	435	2	Gr.-viol. 4	Violet
17,90	19/100	590	1,25	Orangé 2	Jaune
11,80	51/100	445	1,75	Gr.-bl. 3,25	Violet
16,55	25/100	545	1,25	Gr.-bleu-vert 2	Vert

TABLEAU PRIS AU HASARD, CONSIGNANT LES RÉPONSES
de Madame M..., Assistante à la Faculté.

que de bleu. Chaque fois qu'il n'était signalé aucune différence de proportion, nous écrivions tout simplement bleu-violet sans rien souligner. Notons, enfin, que nous avons classé respectivement les réponses "indigo" et "jaune-rouge" dans le bleu-violet et l'orangé.

Dès à présent, nous pouvons signaler que l'ensemble des résultats obtenus au seuil et en vision photopique sera présenté, dans le chapitre suivant, sous forme de deux tableaux récapitulatifs.

= L'idée d'une étude psychologique terminale nous semble avoir été très fructueuse. Le protocole de cette étude était variable parce que fonction des réponses de l'observateur. En effet, spontanément, le plus souvent, le sujet critiquait son appréciation colorée et nous l'exhortions alors à développer sa pensée. Certaines de ces restrictions nous ont beaucoup éclairé sur l'interprétation à donner aux tracés obtenus et nous y reviendrons dans des chapitres ultérieurs.

CONCLUSION

Certes, on peut nous opposer qu'il aurait mieux valu que l'expérimentateur laisse au sujet le soin de régler lui-même le flux lumineux. De ce fait, le risque de dépasser la fin de l'intervalle photochromatique sans s'en rendre compte devenait, évidemment, moins grand.

Nous ne pensons pas que cette critique soit absolument méritée, puisque, a priori, nous devons nous adresser à n'importe quel observateur ayant une vision colorée normale. Dans ces conditions, pour ménager notre appareillage relativement fragile, c'est-à-dire pour faire passer le plus de candidats possible, il nous a paru souhaitable de faire nous-

même la manipulation. L'expérience, par ailleurs, a montré, pour quelques sujets qui pensaient avoir répondu trop tardivement, que la reprise de la mesure à leur insu, après avoir passé quelques longueurs d'onde, n'apportait pratiquement pas de modifications à la réponse, tant du point de vue de la couleur que de la tension d'alimentation.

Nous pensons, par conséquent, qu'en utilisant le protocole expérimental que nous venons de décrire, nous n'apportons aucune perturbation notable capable de nous induire en erreur, en ce qui concerne la détermination de la fondamentale de courte longueur d'onde. Celle-ci, s'il est vrai qu'au seuil chromatique seules sont excitées les fondamentales, doit apparaître nettement malgré les quelques imperfections de notre appareillage.

C H A P I T R E I V

CONSIDERATIONS GÉNÉRALES

AVANT L'EXPOSÉ DÉTAILLÉ DES RÉSULTATS.

TABLEAUX SYNOPTIQUES DES RÉPONSES

Les résultats obtenus, tant à la fin de l'intervalle photochromatique qu'en vision franchement photopique, sont résumés dans les tableaux ci-après. Chaque colonne y caractérise, pour différentes longueurs d'onde, le type de réponse colorée obtenue, et chaque ligne horizontale y rend compte des couleurs perçues pour un stimulus déterminé. Le chiffre placé à l'intersection d'une ligne et d'une colonne caractérise un nombre de réponses d'une couleur déterminée pour une longueur d'onde précise.

Nous adjoindrons à ces tableaux des diagrammes de points qui, s'ils n'apportent aucune donnée complémentaire, ont l'avantage d'être plus parlants. Cependant, pour éviter toute interprétation erronée, nous n'y ferons figurer que les longueurs d'onde comprises entre 410 et 570 mμ. En effet, les stimuli monochromatiques soumis à l'appréciation des observateurs sont distants les uns des autres, dans toute cette région du spectre, de 10 mμ seulement. Par contre, dans les grandes longueurs d'onde, nous avons été réduit, pour ne pas être gêné par les phénomènes de fatigue, à nous contenter de quelques pointés faits avec les radiations 590, 610, 630,

NOMBRE DE REPONSES EN VISION PHOTOPIQUE DE 45 SUJETS

Intervalle de classe	Point médian	Violet	Bleu-violet	Bleu	Bleu-vert	Vert	Vert jaune	Jaune	TOTAL
410-420	415	44	1						45
420-430	425	42	3						45
430-440	435	36	9						45
440-450	445	32	13						45
450-460	455	20	21	4					45
460-470	465	6	16	23					45
470-480	475		3	34	8				45
480-490	485			21	23	1			45
490-500	495			2	20	23			45
500-510	505			1	13	31			45
510-520	515				8	37			45
520-530	525				5	40			45
530-540	535				1	41			45
540-550	545					31	3		45
550-560	555					8	34	3	45
560-570	565						32	13	45

NOMBRE DE REPONSES EN VISION PHOTOPIQUE DE 17 SUJETS

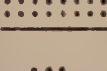
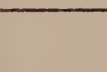
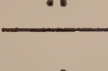
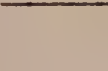
Longueurs d'onde mμ	Vert	Vert-jaune	Jaune	Orangé	Rouge	TOTAL
555	3	13	1			17
565		12	5			17
590			3	14		17
610				11	6	17
630				2	15	17
660					17	17

N.B. - L'expérience nous ayant montré que les grandes longueurs d'ondes favorisaient l'apparition des phénomènes de fatigue, quand elles étaient vues à la tension maxima de notre monochromateur, nous avons préféré arrêter l'étude au 17^{me} sujet pour les rayonnements 590 - 610 - 630 et 660 mμ.

REPONSES A LA FIN DE L'INTERVALLE PHOTOCHROMATIQUE (33 sujets)

	Violet	Bleu-Violet	Bleu	Bleu-vert	Vert	Vert-jaune	Jaune	Orangé	Rouge
410									
420					•		•		
430					•		••		
440					••				
450					•••				
460									
470					••				
480				•	••	•			
490		••							
500		•							
510	•••	•							
520	••					••			
530	•					•••			
540	•								
550	•	•		••		•••	•		
560	•		•	•					
570	•	•	•	•	•••			••	

REPONSES EN VISION PHOTOPIQUE DE 45 SUJETS

	Violet	Bleu-violet	Bleu	Bleu-Vert	Vert	Vert-Jaune	Jaune
410							
420							
430							
440							
450							
460							
470							
480							
490							
500							
510							
520							
530							
540							
550							
560							
570							

660 mμ. On comprend dès lors, aisément, que si nous représentions ces longueurs d'onde sur le même diagramme, nous pourrions induire le lecteur en erreur puisque les intervalles de classe sont, ici, différents.

CHOIX D'UNE METHODE D'ETUDE

Toute étude statistique complète doit se subdiviser en trois parties qui se recoupent mutuellement. On peut, en effet :

- soit rechercher une notion d'association ou d'indépendance entre un caractère chiffré, la longueur d'onde, et un attribut qualitatif, la couleur ;

- soit considérer, pour une longueur d'onde déterminée, le pourcentage des diverses réponses colorées fournies par les observateurs ;

- soit, enfin, étudier, en fonction de la longueur d'onde, le nombre de réponses qui caractérise une couleur donnée.

Nous avons choisi délibérément de faire porter tous nos efforts sur cette troisième possibilité, et nous donnons ci-après les raisons qui nous ont conduit à ce choix.

Il nous semble, en effet, peu rigoureux de tenter de trouver statistiquement une relation entre deux caractères dont l'un est "quantitatif", la longueur d'onde, et l'autre qualitatif, la couleur. Les tableaux que nous avons dressés ne constituent, à proprement parler, ni des "tableaux de contingence", relatifs à des couples de caractères qualitatifs, ni des "tableaux de corrélation", relatifs à des couples de caractères quantitatifs.

Certes, on aimerait pouvoir rechercher une corrélation entre les deux caractères étudiés, en transformant l'attribut "couleur" en un caractère chiffré. Bien que la teinte ne soit pas une grandeur sensorielle mesurable au sens strict, nous avons eu, un instant, l'idée de définir ce que nous aurions appelé la longueur d'onde psychologique d'une couleur. La détermination de cette longueur d'onde psychologique, définie comme la longueur d'onde moyenne correspondant à un type de réponse colorée, se serait faite en vision franchement photopique. Nous aurions dressé, pour une réponse colorée donnée, l'histogramme caractérisant la fréquence absolue des réponses en fonction de la longueur d'onde. Les moyennes statistiques des différentes distributions ainsi obtenues seraient, du point de vue dimensionnel, des longueurs d'onde, mais caractériseraient, sur le plan psychologique, une couleur.

Des travaux similaires ont déjà été faits par différents auteurs et nous renvoyons le lecteur à la page 60 (Tableau 8) du Tome 2 du Traité d'Optique physiologique de Yves LEGRAND. Il faut, cependant, noter que les déterminations n'ont eu lieu que pour les limites des couleurs spectrales, en faisant abstraction des couleurs intermédiaires du type bleu-violet ou bleu-vert. Dans un autre ordre d'idées, nous demanderons au lecteur de consulter la figure 61, donnant les lignes d'égale tonalité d'après NEWHALL, NICKERSON et JUDD, reproduite par Yves LEGRAND page 224.

Si nous n'avons pas poursuivi notre travail dans ce sens, ce n'est pas parce que de grands noms nous avaient précédé dans une entreprise très voisine. C'est que nous pensions qu'une étude, tant soit peu précise, risquerait d'occasionner une fatigue oculaire importante. Par ailleurs, pour des questions de transparence cristallinienne, nous aurions dû nous astreindre à recruter des sujets du même âge, en supposant a priori qu'à un âge déterminé la transparence du cristallin, pour une radiation monochromatique visible, est à peu près la

même pour deux observateurs d'une telle population. Notons, au passage, que nous exposons là une méthode longue et difficile, mais qui permettrait de connaître approximativement comment varie la transparence cristallinienne en fonction de l'âge, le long du spectre visible, pour peu que les stimuli monochromatiques soient relativement voisins les uns des autres.

En ce qui concerne le travail que nous présentons ici, nous avons négligé ces différences de transparence cristallinienne et c'est la première considération qui nous a surtout arrêté. Nous développerons plus loin le fait qu'il existe une "corrélation" relativement serrée entre la longueur d'onde et la couleur en vision photopique ; mais nous ne nous attarderons pas sur un tel sujet.

° °

Pour ce qui est de l'étude, à longueur d'onde constante, du pourcentage des diverses réponses colorées données par nos observateurs, nous nous trouvons devant un problème à peu près identique au précédent. En effet, un pourcentage est une quantité chiffrée, alors qu'une réponse colorée, qu'elle soit bleue, verte ou rouge, n'est pas mesurable. Nous serions donc conduit, en adoptant ce mode de représentation, à attribuer arbitrairement un espace égal à chaque nom de couleur pour pouvoir établir des histogrammes, et ce caractère arbitraire nous choque un peu.

Nous avons, par conséquent, rejeté ce mode de représentation qui, par son manque de rigueur, pourrait conduire à des conclusions erronées. En effet, si de tels diagrammes sont fréquemment utilisés dans les sciences biologiques parce qu'ils frappent le lecteur, ils n'en nécessitent pas moins, de la part de l'expérimentateur, une attention toujours soutenue. Aussi, dans le but de ne pas nous laisser

entraîner à des considérations qui seraient suggérées par des "figures" fausses, nous avons préféré, autant que possible, nous en abstenir.

°
° °

Par contre, le fait d'étudier, pour une couleur bien déterminée, le nombre de réponses en fonction de la longueur d'onde, ne présente que des avantages. Chacune de ces variables est caractérisée par un chiffre : sur les ordonnées peuvent être figurées des quantités mesurables, sur les abscisses aussi. Le caractère qualitatif qu'est la couleur devient un caractère fixe, une constante.

Certes, ce mode de représentation peut aboutir à des tracés moins parlants, mais il a tous les avantages de la rigueur et on ne peut en tirer que ce qui y est contenu. Nous donnerons, donc, dans le chapitre suivant, tous nos résultats sous cette forme ; mais nous pouvons, dès à présent, comparer les deux diagrammes ci-dessus, pour avoir une vue générale de nos données.

COMPARAISON DES TABLEAUX SYNOPTIQUES

L'étude comparative des deux tableaux dressés, suivant les mêmes conventions, l'un pour les réponses à la fin de l'intervalle photochromatique, l'autre pour les réponses franchement photopiques, est, en effet, possible sans risque important d'erreur. Elle suggère déjà quelques résultats intéressants.

D'une part, il est facile de constater qu'au voisinage du seuil, les points sont très dispersés, alors qu'ils se groupent d'une manière satisfaisante lorsqu'on se place à des niveaux nettement supra-liminaires. Nous avons pu, d'ailleurs, vérifier qualitativement que, pour des niveaux lumineux inter-

médiatrices, la dispersion des réponses, à couleur déterminée, prenait des valeurs intermédiaires. Nous pensons, par conséquent, pouvoir affirmer, qu'entre certaines limites de luminance, la dispersion des réponses, pour un même nom de couleur, décroît de façon continue lorsque l'énergie lumineuse augmente.

D'autre part, il semble se dégager, en vision photopique, une "corrélation" certaine entre la couleur et la longueur d'onde. Ceci n'est pas pour nous étonner, car nous savons qu'un coefficient de corrélation entre deux variables x et y est une quantité inversement proportionnelle au produit des écarts type σ_x et σ_y . Or, en vision photopique, nous venons de préciser que ces écarts types sont plus faibles qu'au seuil. Il est donc normal qu'une "corrélation" de ce genre n'apparaisse qu'à des niveaux nettement supraliminaires et varie dans le sens opposé à la variation des écarts types.

Quoi qu'il en soit, une telle "corrélation" entre la longueur d'onde et la couleur ne peut constituer qu'une première approximation. Certes, il est toujours possible de définir pour un attribut "couleur" un certain coefficient de "corrélation", mais, lorsqu'il s'agit du spectre visible tout entier, il faut recourir à d'autres méthodes. En effet, le coefficient global de "corrélation" ne pourrait être, alors, que la moyenne des différents coefficients ainsi déterminés ; c'est dire qu'il n'aurait pas, à proprement parler, de sens concret.

Nous retrouvons, ici, une des étapes capitales de l'optique physiologique. N'a-t-on pas, en effet, commencé par "admettre une correspondance rigoureuse entre la stimulation et la sensation, entre la physique et la psychologie" ? Cette hypothèse "si naturelle" qui revient à attribuer, indépendamment des niveaux lumineux, à un coefficient de "corrélation" quelconque, la valeur unité, était absolument nécessaire au début. Mais, bien vite, on s'est rendu compte, par le phénomène de BEZOLD-BRÜCKE et par

bien d'autres phénomènes, qu'une sensation colorée n'était pas seulement "le signe d'une longueur d'onde déterminée". Entre autres paramètres, elle dépend aussi de l'énergie lumineuse employée. Les lois de GRASSMAN, déjà entrevues par NEWTON, peuvent sembler avoir marqué "la rupture définitive entre la stimulation et la sensation", mais il existe, quand même, une "corrélacion" entre la longueur d'onde et la couleur. Cette "corrélacion", relativement satisfaisante en vision photopique, se relâche au fur et à mesure que la luminance décroît.

CH A P I T R E V

EXPOSE DETAILLE DES RESULTATS

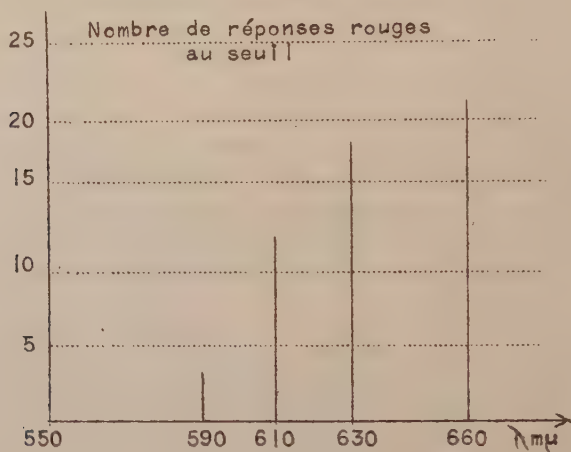
Ainsi que nous l'avons fait pressentir au chapitre précédent, nous présenterons nos résultats sous forme de diagrammes portant en abscisses les longueurs d'onde et en ordonnées la fréquence absolue des réponses pour chaque nom de couleur.

Dans les courtes longueurs d'onde, nos données nous ont facilement permis une représentation sous forme d'histogramme avec des intervalles de classe de 10 mμ. Dans les grandes longueurs d'onde, par contre, nos différents pointés sont trop distants les uns des autres et trop peu nombreux pour que nous puissions distinguer des classes. L'idéal est donc, dans cette région du spectre, de recourir à une représentation sous forme de diagrammes en bâtonnets. C'est ce que nous ferons en évitant l'utilisation de polygones de fréquence qui donnent l'impression fausse qu'une certaine fréquence puisse être attribuée à une "valeur de la variable comprise entre celles des points représentatifs de la distribution".

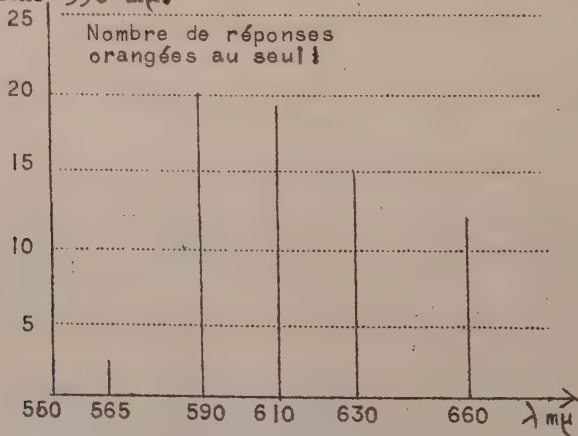
Ceci posé, nous donnerons successivement nos résultats en vision juste supra-liminaire et en vision franchement photopique. Nous nous excusons auprès du lecteur de la sécheresse d'exposé qui peut en résulter, mais nous pensons que nous gagnerons ainsi en clarté.

RESULTATS AU SEUIL CHROMATIQUE

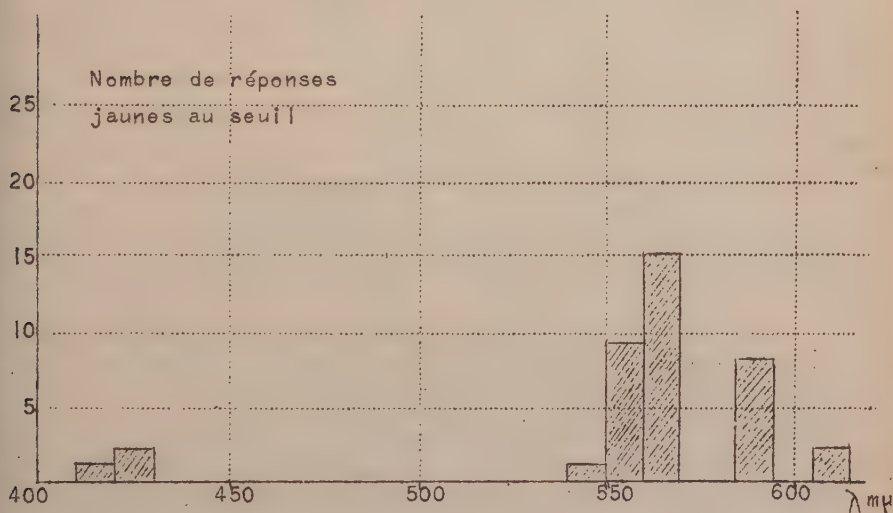
Les réponses rouges et rougeâtres, obtenues au seuil chromatique, se distribuent suivant le diagramme ci-dessous. On constate que les fréquences absolues augmentent au fur et à mesure que la longueur d'onde croît.



Les réponses orangées, qui groupent à la fois les teintes jaune-orangé, orange, et rouge-orangé, présentent une distribution unimodale. La fréquence absolue maxima de ces réponses correspond à la longueur d'onde 590 $m\mu$.

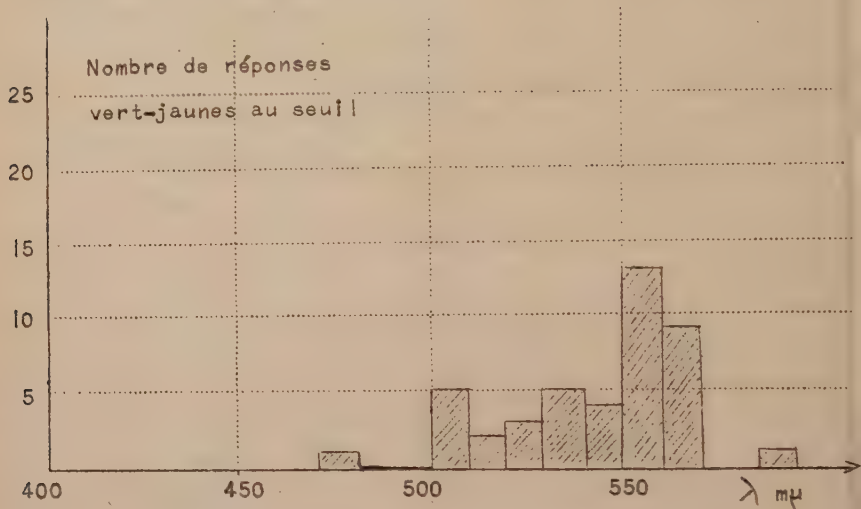


Les réponses jaunes et jaunâtres ont été présentées sous forme d'histogrammes, parce qu'on en rencontre dans les courtes longueurs d'onde comme dans les grandes. Nous précisons cependant, au lecteur, qu'entre 570 et 585 m μ et qu'entre 595 et 605 m μ , nous n'avons soumis à l'appréciation de nos observateurs aucun rayonnement monochromatique. Il faut donc avoir présent à l'esprit que les vides de notre histogramme, dans ces régions, ne correspondent pas à une non-perception de jaune.

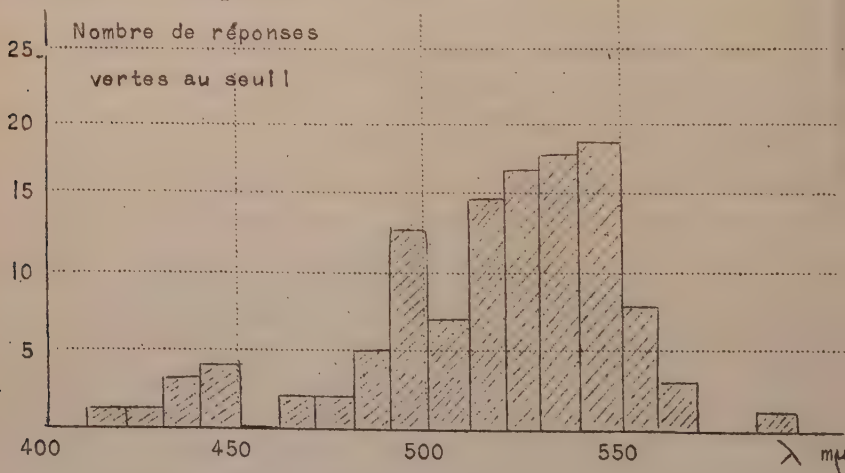


Les réponses vert-jaunes sont données dans l'histogramme ci-dessous. Si, comme précédemment, le vide existant entre 570 et 585 m μ n'est pas dû à l'absence de perception de vert-jaune dans cette région, le vide que l'on constate entre 480 et 500 m μ correspond, par contre, à la non-perception de cette couleur. La distribution vert-jaune présente une valeur modale bien déterminée, puisque les fréquences absolues maxima se trouvent pour la classe 550-560 m μ . Il faut, en outre, signaler l'existence de deux valeurs modales accessoires à 505 et 535 m μ , dont nous réservons expressément le caractère statis-

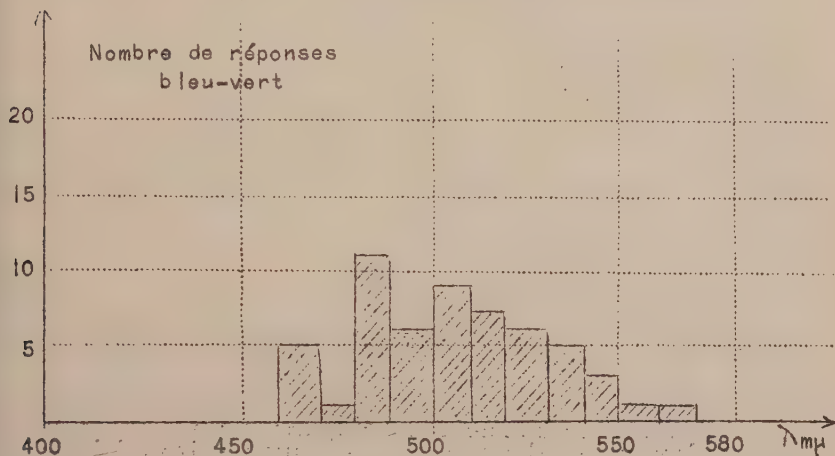
tiquement significatif. Notons, à ce propos, que nous émettons les mêmes réserves pour toutes les valeurs modales multiples que nous rencontrerons au cours de cet exposé.



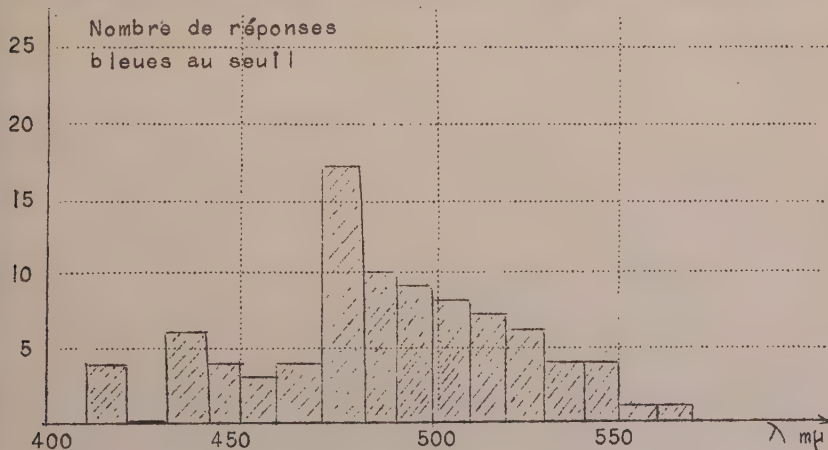
Les réponses vertes se distribuent de manière relativement tourmentée, puisqu'elles présentent plusieurs valeurs modales : l'une à 445 mμ, la seconde à 495 mμ et la troisième à 545 mμ. Signalons que le vide existant entre 570 et 585 mμ est encore un artéfact, tandis que celui que l'on observe entre 450 et 460 mμ a une valeur significative, indépendamment du sens statistique de ce mot.



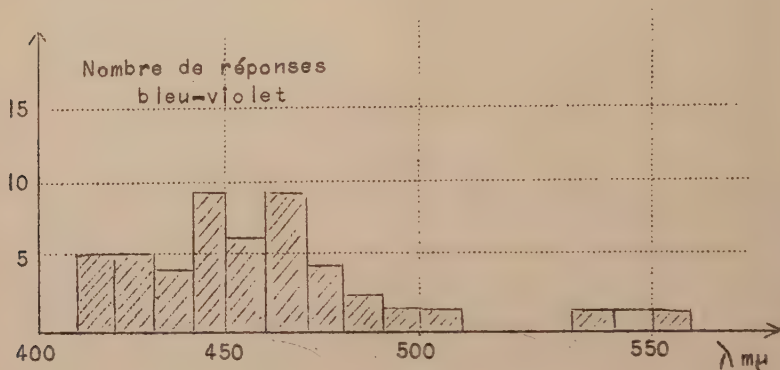
Les réponses bleu-vert donnent lieu, elles aussi, à une distribution tri-modale. Un fait est remarquable : c'est l'existence d'un maximum à 505 m μ comme pour les réponses vert-jaune. Il existe, en outre, deux autres valeurs modales : l'une à 465 m μ , l'autre à 485 m μ .



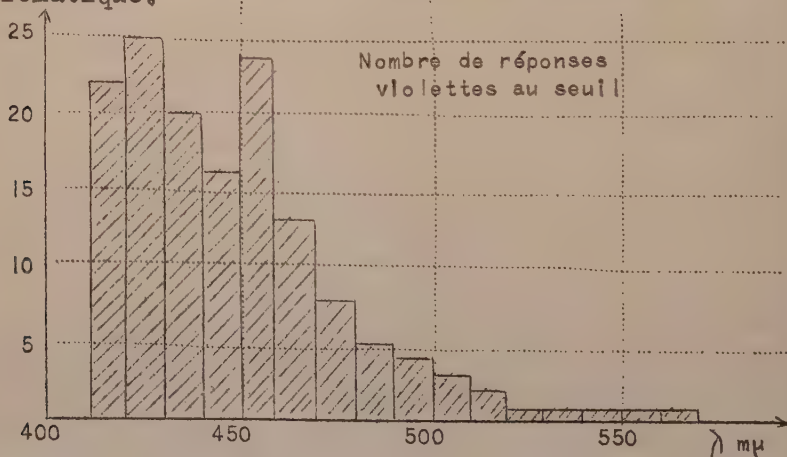
Les réponses bleues s'étalent de l'extrême violet à l'extrême vert, avec un maximum évident à 475 m μ et un petit accident probablement statistiquement non significatif à 435 m μ . Le caractère dissymétrique de l'histogramme des réponses bleues saute aux yeux et nous discuterons plus tard les interprétations que suggère une telle dispersion.



Les réponses bleu-violet présentent deux petits accidents dans la région jaune-vert du spectre et deux valeurs modales : l'une à 445 m μ , l'autre à 465 m μ . Ce deuxième maximum nous paraît un peu trop bleu et nous réservons, là encore, notre interprétation à plus tard.



Quant aux réponses violettes, elles se distribuent suivant un histogramme à deux maxima, bien que la couleur violette ait un caractère unitonal. L'un de ces maxima se situe à 425 m μ , l'autre à 455 m μ , dans une région du spectre qu'on aurait tendance, pour le moins, à qualifier de bleu-violet. Nous réservons à plus tard la discussion statistique de la valeur de ce deuxième maximum. Cependant, nous pouvons noter, dès à présent, que cet aspect compact de la distribution violette est un phénomène massif qui s'atténue très lentement lorsqu'on dépasse le seuil chromatique.

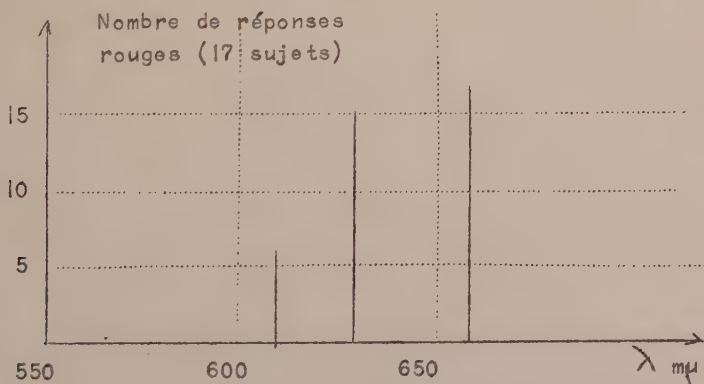


RESULTATS EN VISION PHOTOPIQUE

Pour des raisons que nous développerons ultérieurement, l'expérimentation a porté, en vision photopique, sur 45 sujets au lieu de 33 au seuil. Cependant, ayant constaté que les grandes longueurs d'onde favorisaient l'apparition de phénomènes de fatigue et rendaient nécessaire une réadaptation à l'obscurité lorsqu'elles étaient vues en vision franchement photopique, nous avons préféré arrêter l'étude au 17^{me} sujet, pour les lumières de longueur d'onde 590, 610, 630 et 660 mμ.

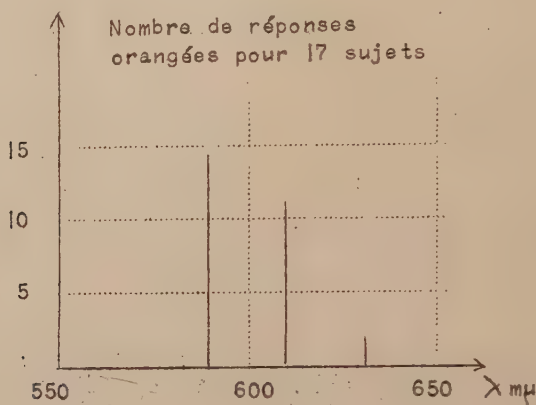
Ceci posé, nous donnons, ci-après, les différents diagrammes établis pour des niveaux de luminance correspondant à la tension maxima de notre monochromateur.

Les réponses rouges, recueillies auprès de 17 observateurs seulement, présentent les caractéristiques que nous leur avons décrites à la fin de l'intervalle photochromatique. Remarquons, en outre, qu'à 660 mμ nous avons une fréquence absolue égale au nombre de sujets entendus.

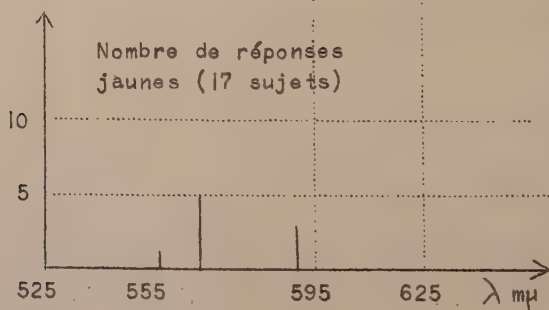


Les réponses orangées se présentent sous la forme du diagramme en bâtonnets ci-dessous. Elles se répartissent manifestement suivant une distribu-

tion uni-modale, puisqu'à 565 m μ on n'en trouve aucune et qu'à 590 m μ se rencontre la fréquence absolue maxima de ces réponses.

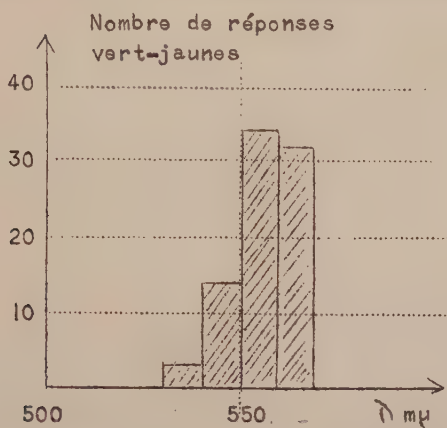


Les réponses jaunes ne méritent pratiquement pas d'être représentées. Nous n'avons pas soumis, en effet, à l'appréciation de nos observateurs de longueur d'onde correspondant à un jaune franc. Ceci est d'autant plus regrettable que les quelques points dont nous disposons à 555, 565 et 590 m μ ne représentent que les limites de ce qui aurait dû être la distribution des jaunes.

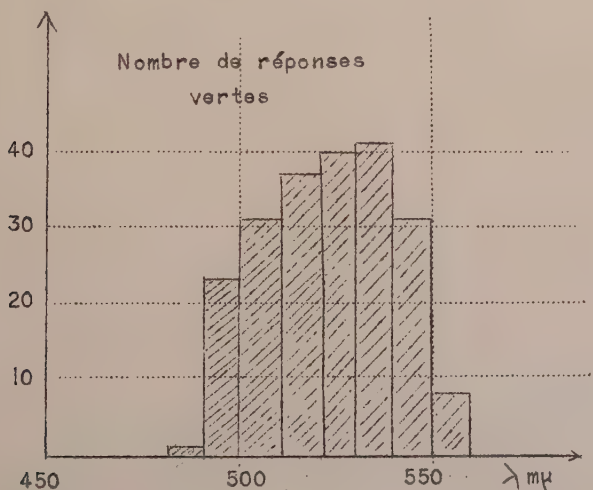


Les réponses vert-jaunes ont, elles aussi, été brutalement arrêtées à 565 m μ à cause de l'absence de longueurs d'onde immédiatement supérieures. Elles nous viennent de 45 sujets et correspondent à des

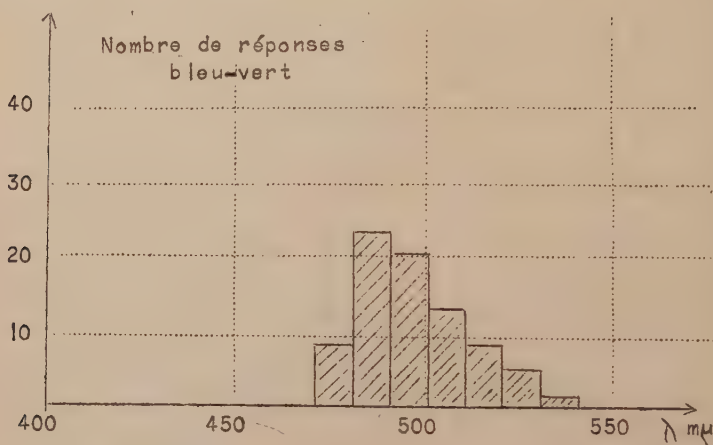
lumières monochromatiques suffisamment proches les unes des autres. Nous pouvons donc adopter une représentation sous forme d'histogramme, mais nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que cet histogramme est incomplet, car nous n'avons pas recueilli toutes les réponses vert-jaunes possibles.



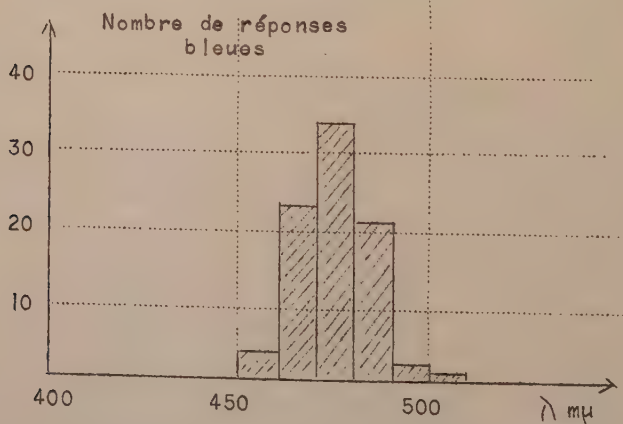
Les réponses vertes se caractérisent par une dispersion très importante et par des fréquences absolues élevées, voisines du nombre d'observateurs entendus, pour les rayonnements compris entre 520 et 540 mμ.



Les réponses bleu-vert sont caractéristiques d'une distribution uni-modale dont l'asymétrie est relativement marquée.

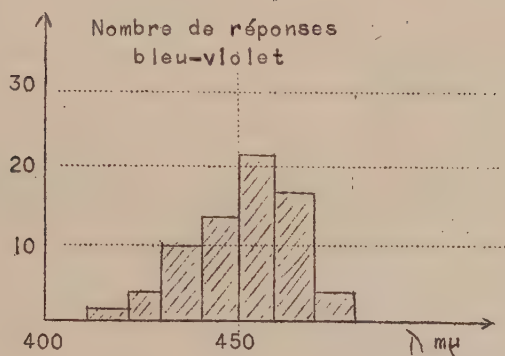


Les réponses bleues ont, par contre, un aspect symétrique très net autour d'une valeur modale de 475 mμ. La dispersion de ces réponses est très faible et nous verrons ultérieurement comment interpréter cette caractéristique.

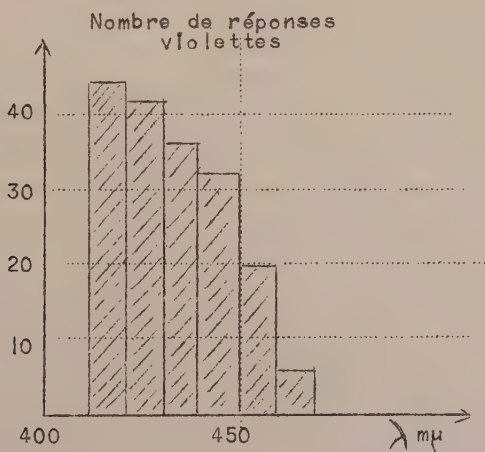


Les réponses bleu-violet, de valeur modale bien définie à 455 mμ, sont, comme les réponses bleu-vert, légèrement asymétriques quant à leur dis-

tribution autour de cette valeur modale.



Les réponses violettes, comme les réponses rouges, ont des fréquences absolues d'autant plus élevées qu'on tend vers l'extrémité du spectre, et nous réservons à plus tard l'interprétation que nous donnerons à ce genre de distribution.



Voici donc le lecteur en possession de l'ensemble de nos résultats. Il regrettera, comme nous, que l'étude de tout le spectre n'ait pu être entreprise, parce que nous avons voulu éviter à tout prix

les phénomènes de fatigue. Il en résulte que nous axerons nos efforts d'interprétation, qui feront l'objet des chapitres suivants, sur les couleurs de courtes longueurs d'onde. Nous tenterons, néanmoins, d'étudier de manière assez précise, à partir de nos données restreintes, ce qui se passe dans l'extrémité rouge du spectre. Par contre, nous ne pensons pas pouvoir tirer des conclusions définitives du petit nombre de réponses jaunes que nous avons à notre disposition et ce d'autant plus que cette couleur très particulière nécessiterait à elle seule une étude statistique complète et minutieuse.

CHAPITRE VI

INTERPRÉTATION DES RESULTATS OBTENUS AU SEUIL POUR LES COULEURS DE COURTES ET MOYENNES LONGUEURS D'ONDE.

INTRODUCTION

Chaque fois qu'il est question, dans la littérature scientifique, de vision des couleurs au voisinage du seuil chromatique, on suppose que les fondamentales sont seules excitées. GÖTHLIN, admettant cette hypothèse, a tenté de déterminer, à ces niveaux liminaires, la fondamentale de courte longueur d'onde, et nous avons précédemment résumé ses travaux. C'est pour essayer d'éclaircir l'opposition qui existe entre ses conclusions et celles de SEGAL que nous avons voulu reprendre cette étude en élargissant son cadre à la détermination de toutes les fondamentales.

Le caractère dispersé des résultats obtenus au seuil semble contredire l'hypothèse qui a conduit les investigations de ces deux auteurs ; mais, lorsque nous avons fait mention de cette dispersion, nous développons des considérations générales et peu fouillées. De telles impressions restent, à nos yeux, insuffisantes pour tirer des conclusions valables, et nous exposerons, ici, l'interprétation qui nous semblera découler de l'étude particulière de chaque distribution de réponses colorées.

Nous avons entrepris d'étudier d'abord les résultats obtenus pour les couleurs de courtes et moyennes longueurs d'onde parce que, dans cette région du spectre, nous disposons, généralement, de rayonnements monochromatiques très voisins les uns des autres. Nous commencerons donc par les réponses jaunes et nous continuerons par les réponses "vert-jaune", vertes, etc..., pour aboutir aux réponses violettes.

ESSAIS D'INTERPRETATION

= Les réponses jaunes et jaunâtres sont difficiles à interpréter à cause des vides que présente notre histogramme. Nous avons déjà signalé que, dans les grandes longueurs d'onde, ces vides ne caractérisent pas une absence de perception de jaune. Nous pensons, si nous négligeons, pour l'instant, les trois sujets ayant répondu jaune dans la région violette du spectre, que le faible écart type de la distribution caractérise ce qu'on appelle la simplicité psychologique de cette couleur.

Cependant, nous nous devons de signaler une remarque faite par un certain nombre de sujets. Pour ces observateurs, la réponse "jaunâtre" semble liée à une sensation de luminosité. Au seuil, ils affirment être tentés de qualifier de "jaunâtre" la plage colorée chaque fois que celle-ci leur paraît tant soit peu lumineuse. C'est, seulement, en tenant compte de cette observation que nous pouvons expliquer les petits accidents jaunes à 415 et à 425 μ qui correspondraient uniquement à une sensation achromatique de lumière perçue dans le domaine scotopique. De façon semblable, nous pouvons expliquer les divers accidents peu significatifs des réponses "vert-jaunâtre" à 475 et à 505 μ .

Cette assimilation à la couleur jaune d'une sensation tant soit peu lumineuse constitue, du point

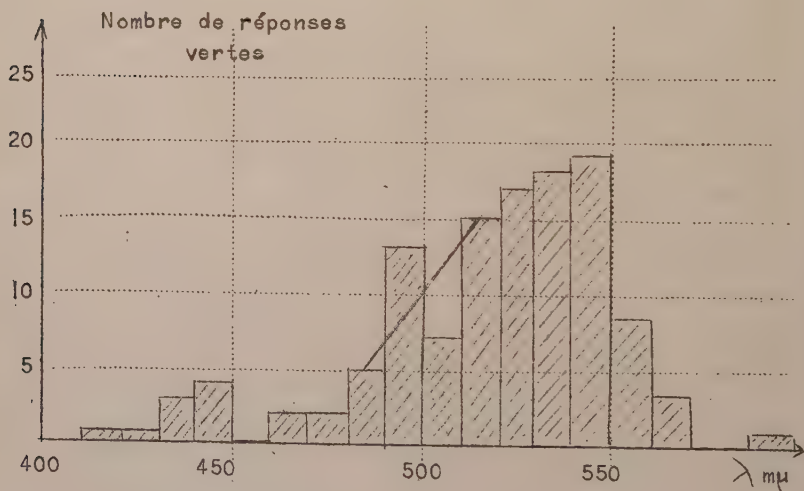
de vue psychologique, un trait intéressant. Elle semble trahir une élaboration intellectuelle consécutive aux progrès de la technique. En effet, dans presque toutes les langues, on retrouve les notions de couleur "chaude" et de couleur "froide" qui caractérisent respectivement les rouges et les orangés d'une part, les couleurs "voisines du bleu" d'autre part. Si l'on admet que ce "fait linguistique" est une "conséquence assez détournée du phénomène de Purkinje", on comprend que, par habitude, on soit tenté de considérer le bleu comme l'indice d'un "faible éclairage et le rouge comme le signe de l'éclairage intense". Le fait que certains sujets soient amenés à considérer qu'une lumière jaunâtre est le propre d'une sensation de luminosité, plus ou moins limitée dans son intensité, laisse à penser que ces sujets ont été suffisamment coupés de la nature, pour élaborer des concepts à partir de l'éclairage artificiel. Les lampes électriques peu puissantes, en effet, donnent une lumière tirant beaucoup plus sur le jaune que les lampes travaillant sous de hauts voltages. On conçoit donc facilement que, dans une population constituée, en majorité, d'étudiants, habitués à travailler depuis longtemps avec un éclairage artificiel plus ou moins adapté, la couleur jaune devienne la caractéristique d'une certaine luminosité.

Bien entendu, il ne s'agit là que d'une interprétation, et nous ne pensons pas, par elle, avoir fait le tour de cette question. Pour s'en convaincre, il suffirait de rappeler la conception d'OVIO sur les couleurs "chaudes", suivant laquelle, plus que l'habitude, interviendraient des systèmes d'association d'idées (idée de rouge, par exemple, associée au sang et au feu).

= Les réponses vert-jaunâtres, ont été, en partie, interprétées lorsque nous avons étudié le cas particulier de la sensation jaune. Nous ne reviendrons pas sur ce que nous avons dit précédemment.

= Les réponses vertes se présentent sous forme d'une distribution très intéressante, parce qu'elle pose de multiples problèmes.

Signalons, dès à présent, que certains sujets pour des longueurs d'onde comprises entre 410 et 450 mμ, nous ont donné comme réponse colorée le mot composé "violet-vert". Ne sachant pas comment classer de telles réponses, nous leur avons demandé de choisir entre le nom "violet" et le substantif "vert". C'est généralement à contre-cœur qu'un tel choix a été fait par les observateurs qui ont préféré répondre vert lorsque la composante verte leur semblait dominer et répondre violet dans le cas contraire. Nous pouvons donc, dès à présent, interpréter le maximum vert, que nous trouvons dans les courtes longueurs d'onde, comme caractérisant, en partie, le complexe "violet-vert".



L'histogramme ci-dessus montre, en outre, un maximum de réponses vertes à 495 mμ, dans une région manifestement "bleu-vert". A ce maximum, fait suite une valeur minima des effectifs, à 505 mμ, qui correspond à des fréquences absolues anormalement élevées des réponses "bleu-vert" et "vert-jaune".

Il est choquant de constater que c'est précisément le point fixe vert du phénomène de Bezold-Brücke qui se trouve affligé d'une dépression dans la distribution des réponses vertes. Il nous semble donc nécessaire de chercher à comparer nos pourcentages expérimentaux à des pourcentages déterminés théoriquement, pour savoir s'il existe entre ces valeurs théoriques et nos déterminations expérimentales des différences significatives. En fait, le test au χ^2 , lorsqu'on choisit comme paramètre théorique la valeur des ordonnées de la droite que nous avons figurée sur l'histogramme des réponses vertes, montre que la différence entre les effectifs expérimentaux et les fréquences absolues ainsi déterminées n'est pas significative. Le maximum observé à 495 m μ est donc sans valeur statistique et le phénomène ne nous semble dû qu'à un artéfact tenant probablement à la multiplicité des critères qu'utilisent les observateurs pour qualifier une couleur.

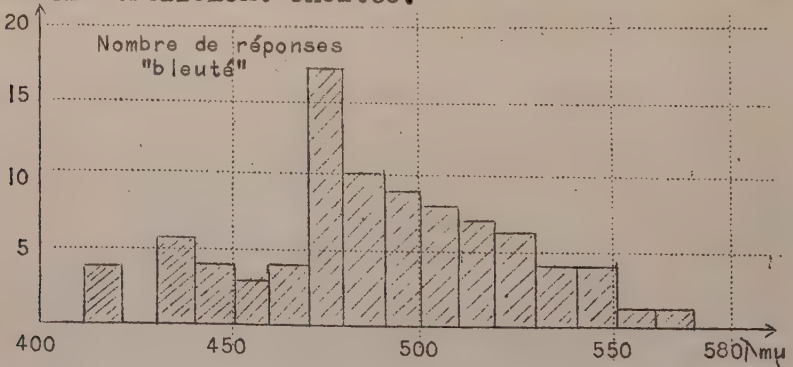
Ceci posé, la distribution des réponses vertes est caractérisée par des fréquences absolues élevées entre 520 et 550 m μ . Elle s'étale beaucoup en longueur d'onde et présente un aspect manifestement dyssymétrique. Le maximum de réponses se trouve, en effet, à 545 m μ , c'est-à-dire à la limite du vert-jaune ; mais, malgré ce caractère asymétrique, les critères que nous venons de donner, portant sur les effectifs et sur la dispersion, nous font penser que la couleur verte peut être considérée comme fondamentale. Signalons, à ce propos, que SEGAL admet une fondamentale bleu-vert et que notre distribution verte nous paraît un peu trop décalée vers les grandes longueurs d'onde.

Le problème de la tonalité de la deuxième fondamentale (tonalité bleu-vert ou verte ?) reste donc entier. Nous espérons, cependant, que l'étude des réponses en vision photopique nous apportera quelques renseignements complémentaires qui nous permettront d'adopter l'une ou l'autre solution.

= Les réponses bleu-vert sont remarquables par le fait qu'elles présentent un maximum à 505 m μ , comme les réponses vert-jaunes. Il est manifeste que ce maximum n'est pas statistiquement significatif et que les effectifs enregistrés sont nettement moins importants que les fréquences absolues vertes. Le problème que nous pose SEGAL en admettant une fondamentale bleu-vert ne peut être nettement tranché à partir de la comparaison des distributions bleu-vert et vertes. Cependant, nous avons tendance à penser que la tonalité de la deuxième fondamentale est verte et non bleu-vert ; mais il s'agit peut-être là d'un simple problème de dénomination des couleurs.

= Les réponses bleues se caractérisent par la dyssymétrie de l'histogramme que nous donnons ci-après. Rappelons que la majorité des auteurs admettent que la couleur bleue est la fondamentale de courte longueur d'onde. Nous sommes donc réduit à chercher, à l'aide de cette fondamentale, les diverses interprétations possibles des distributions obtenues dans cette région du spectre. C'est dans la mesure où ces interprétations ne se heurteront pas à des données expérimentales irréductibles que nous pourrions confirmer les conclusions de GÖTHLIN.

Si nous admettons, avec cet auteur, que la fondamentale de courte longueur d'onde est bleue, nous pouvons supposer que la dispersion des réponses bleues, au seuil, tient au fait qu'à la fin de l'intervalle photochromatique, cette fondamentale est préférentiellement excitée.



Cependant, nous avons montré, pour les grandes longueurs d'onde, qu'à l'excitation préférentielle de la fondamentale, peuvent se superposer des phénomènes psychologiques. Dans les courtes longueurs d'onde, les sujets, eux-mêmes, nous ont précisé que leurs réponses "bleuté" caractérisaient une sensation de couleur "froide". Nous sommes donc enclin à penser que la perception d'une couleur "froide" est psychologiquement interprétée comme "bleuté" à un niveau juste subliminaire. Ce phénomène nous paraît devoir être rapproché du phénomène de Purkinje et nous pensons qu'il s'agit là d'une interprétation colorée de la "sensation scotopique".

Il en résulte que l'histogramme des réponses bleues devrait associer aux réponses liées à l'excitation de la fondamentale bleue hypothétique, celles correspondant à "l'interprétation de la sensation scotopique". Cette distribution devrait donc se caractériser, non seulement par une forte dispersion, mais aussi par des fréquences absolues importantes. Or, nous constatons que, dans l'ensemble, les fréquences absolues rencontrées pour les réponses bleues sont plus faibles que celles rencontrées pour les réponses violettes et vertes.

Par ailleurs, pour concevoir le fait que les réponses bleues puissent aller jusque vers 550 m μ , nous sommes obligé d'admettre que, dans cette région verte, de telles réponses ne peuvent caractériser qu'une interprétation psychologique. En effet, il est assez invraisemblable de penser qu'à des longueurs d'onde si élevées, la fondamentale bleue soit aussi souvent excitée.

Cette même interprétation psychologique se retrouve dans l'extrémité violette du spectre, et la région bleu-violet devrait, si l'on admet une fondamentale bleue, associer, elle aussi, aux réponses liées à l'excitation de cette fondamentale, celles liées à l'interprétation de la sensation scotopique. Or, nous constatons que, bien qu'il existe à 435 m μ un petit maximum bleu, ce maximum est très inférieur à l'ensemble des fréquences absolues des

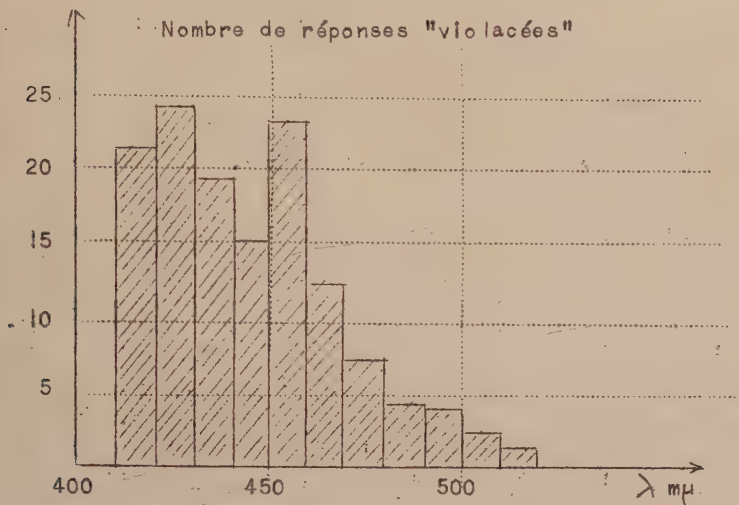
réponses violettes. Celles-ci, en effet, ont un aspect massif qui est inexplicable si le violet n'est pas une fondamentale. D'autre part, on conçoit difficilement que la fondamentale bleue ne soit excitée préférentiellement au seuil que dans une zone très étroite, entre 470 et 490 mμ.

Nous sommes, par conséquent, amené à penser que la fondamentale de courte longueur d'onde n'est pas bleue et que la forte dispersion des réponses bleutées tient uniquement à l'interprétation de la sensation scotopique.

= Pour les réponses violettes, le maximum, trouvé à 455 mμ dans la région bleu-violet du spectre, n'est pas significatif, comme le montre le test au χ^2 . Il en résulte que l'on peut toujours ajuster une sigmoïde à la distribution violette. La médiane d'une telle sigmoïde se trouve nettement au-delà de 450 mμ, et ce fait cadre bien avec les observations de SEGAL : certains sujets, n'interprétant pas comme colorée leur sensation scotopique, expliciteraient dans la région bleu-violet du spectre, au seuil chromatique, une sensation correspondant à l'excitation préférentielle de leur fondamentale violette. Cet accord entre nos résultats et les conclusions de SEGAL nous conduit à admettre que la fondamentale de courte longueur d'onde est violette. Cependant, comme pour la fondamentale bleue, c'est dans la mesure où l'interprétation de nos histogrammes, à partir de la notion de fondamentale violette, ne se heurtera pas à des données expérimentales irréductibles, que nous pourrions confirmer l'opinion de SEGAL.

L'hypothèse d'une fondamentale violette nous permet de concevoir les rares réponses "violet-vert" recueillies dans la région indigo du spectre. Si nous admettons que ces réponses correspondent à l'excitation non synchrone et pour ainsi dire alternative des deux fondamentales violette et verte, peut-être à cause de la mobilité oculaire, nous pouvons

comprendre que ce type de stimulation ne donne pas une impression bleue et relier ce phénomène au problème de la réalité de l'indigo.



Histogramme modifié.

(Nous avons enlevé les réponses de Melle P...)

Les réponses bleues, sauf dans le très court intervalle compris entre 470 et 490 mμ, caractérisent, dans le cas d'une fondamentale violette, uniquement une sensation de couleur "froide". L'existence du maximum bleu à 475 mμ au point bleu fixe du phénomène de Bezold-Brücke, cadre, lui aussi, très bien avec l'explication que SEGAL donne de ce phénomène. Cependant, il nous faut signaler que cet auteur dit parvenir, au seuil chromatique, à un "spectre tripartite" où il perçoit du violet, du bleu-vert et du rouge avec une ligne grisâtre à la place du bleu et du jaune. Si cette constatation se vérifiait, notre maximum bleu n'aurait pas sa raison d'être ; mais, pour l'instant, nous ne la croyons pas suffisamment bien établie.

Cette interprétation psychologique de la sensation scotopique perturbe l'histogramme des réponses bleu-violet et explique la persistance de

ces réponses au-delà de 465 m μ , c'est-à-dire dans une région presque bleue. Au cas où la deuxième fondamentale ne serait pas bleu-vert, c'est encore aux perturbations amenées par cette interprétation bleutée de la sensation scotopique que l'on pourrait attribuer la persistance des réponses "bleu-vert" au-delà de 505 m μ : il s'agirait, alors, de réponses vertes normales qui seraient tempérées par cette interprétation psychologique.

Il nous faut signaler que nous n'avons pas tenu compte d'un sujet exceptionnel, Mademoiselle P..., 27 ans, pharmacienne, qui percevait du violet dans tout le domaine vert allant de 520 à 570 m μ . Ce n'est qu'à un niveau énergétique nettement supra-liminaire que cette personne, n'ayant, par ailleurs, aucune anomalie de la vision des couleurs, était capable de percevoir, de l'extrémité violette du spectre à l'extrême vert, une autre sensation que celle de violet. Il est possible qu'elle soit atteinte d'une affection pathologique portant sur l'appréciation des radiations visibles de courtes longueurs d'onde ; mais, jusqu'à preuve du contraire, nous la considérons comme normale, n'ayant pu entreprendre à ce propos une étude complète.

L'existence d'un cas aussi particulier que celui-ci ne nous semble pas devoir faire rejeter l'hypothèse d'une fondamentale violette. En effet, les distributions obtenues dans les courtes longueurs d'onde s'interprètent d'une manière satisfaisante lorsque l'on admet que la troisième fondamentale est violette, alors qu'on se heurte à de sérieuses difficultés lorsqu'on la suppose bleue. Nous sommes donc tenté de nous ranger sur l'opinion de SEGAL, pour qui cette fondamentale est nécessairement violette et qui donne, par ailleurs, une explication intéressante du phénomène de Bezold-Brücke.

°
° °

CONCLUSION

Au terme de cette étude un peu longue et difficile, il nous paraît intéressant de faire ressortir quelques idées générales.

En effet, on a toujours supposé qu'au voisinage du seuil chromatique les fondamentales étaient seules excitées. Or, nous constatons que, si cette hypothèse se trouve, en partie, vérifiée, il est néanmoins difficile de séparer, à ces niveaux de luminance, l'excitation préférentielle d'une fondamentale de la tendance qu'ont les observateurs à interpréter leurs sensations. Le concept de couleur "chaude" et celui de couleur "froide" en sont des exemples. Ces notions, qui ne présentent avec la longueur d'onde du stimulus proposé qu'une relation assez lointaine, compliquent singulièrement les phénomènes observés. On est, en outre, gêné par des élaborations intellectuelles d'un degré supérieur, comme celle qui consiste à assimiler à la couleur jaune toute sensation tant soit peu lumineuse.

Par ailleurs, devant l'impossibilité d'expliquer, à partir de la fondamentale bleue, les distributions obtenues, nous avons été amené à attribuer une longueur d'onde dominante située dans le violet à la fondamentale de courte longueur d'onde. Certes, nous n'avons pas été le premier à avoir cette idée et les conceptions d'auteurs comme KÖNIG et SEGAL, avançant la même opinion, nous semblent une confirmation de nos conclusions.

Cependant, nous ne pensons pas avoir tout éclairci du problème de la vision des couleurs au voisinage du seuil chromatique. Les questions qui se posent lorsqu'on étudie la distribution des réponses vertes et "bleu-vert" sont là pour le prouver. Par ailleurs, l'aspect de l'histogramme des verts, qui est très étalé en longueurs d'onde et qui présente des effectifs importants dans une région qui n'est pas bleu-vert, nous conduit à penser que la deuxième fondamentale est verte, contrairement à l'opinion de SEGAL.

CHAPITRE VII

INTERPRETATION DES RESULTATS

OBTENUS AU SEUIL

POUR LES COULEURS DE GRANDES LONGUEURS D'ONDE

ESSAIS D'INTERPRETATION

= Les réponses rouges et rougeâtres ont des effectifs qui croissent avec la longueur d'onde. Leur fréquence absolue est, en effet, nettement plus importante à 660 m μ qu'à 590 m μ . Il est fort probable que, si nous avions proposé à nos observateurs des lumières encore plus extrêmes, le nombre de réponses rouges aurait été plus grand. A la limite, à partir d'une longueur d'onde donnée, tous les sujets normaux doivent donc répondre rouge, dans le visible. Tout se passe, par conséquent, comme si la distribution des réponses rouges devait atteindre un plateau caractérisé par des fréquences absolues égales au nombre d'observateurs.

Nous pensons que cette distribution, qui tend à présenter un palier, n'est pas étonnante pour les réponses rouges et rougeâtres. Nous devions nous y attendre étant donné le caractère unitonal de cette couleur. Cependant, nous croyons que cet aspect tient aussi au fait que l'intervalle photochromatique est extrêmement réduit, pour ne pas dire inexistant, dans cette extrémité du spectre. Il en résulte une excitation des seuls cônes rétinien qui fait que nous sommes déjà pratiquement en vision

photopique.

Yves LEGRAND a fait remarquer qu'"il subsiste, même dans la fovéa, un léger intervalle photochromatique, dû au fait général, en psychologie, qu'un stimulus doit toujours dépasser un peu le seuil absolu, où son existence seule est perçue, pour que le sujet puisse en apprécier les attributs". On pourrait, à partir de cette remarque, expliquer ce que nous avons constaté.

Il existe, en effet, chez la plupart des sujets, avant la sensation colorée rouge, une impression de couleur "chaude". Un de nos observateurs, Monsieur Chanteur, Chef de travaux au laboratoire, l'a particulièrement bien précisé : "Je réponds rouge", dit-il, mais je ne peux pas dire objectivement que je vois rouge ; je sais que la plage colorée va devenir rouge". De nombreux sujets pensent, aussi, que leur réponse rouge est dictée par une sorte de prémonition : ils sentent une couleur "chaude" et ensuite, seulement, pressentent que cette couleur sera rouge. Par contre, un nombre équivalent d'observateurs sentent une couleur "chaude", qui est, en même temps, rouge. Un autre groupe de sujets marque une hésitation : ces sujets n'osent pas qualifier de rougeâtre cette sensation de couleur "chaude" et ils ont recours aux réponses orangées. En fait, il s'agit, plus souvent encore, de réponses "rouge-orangé" où ils mettent quelquefois plus de rouge que d'orangé ou croient percevoir plus d'orangé que de rouge. Cette hésitation se traduit, sur le diagramme en bâtonnets des réponses orangées, par une fréquence assez grande de ces réponses pour des longueurs d'onde rouges.

Si nous voulons serrer de plus près cette question, il nous faut préciser que notre distribution des réponses orangées comporte, à la fois, les réponses "jaune-orangé", "orangé" et "rouge-orangé". Le tableau suivant donne le nombre de réponses de tel ou tel type en fonction de la longueur d'onde. Pour la couleur composée "rouge-orangé", nous y avons souligné le mot orangé quand le sujet croyait voir

plus d'orangé que de rouge et le mot rouge quand il pensait percevoir plus de rouge que d'orangé

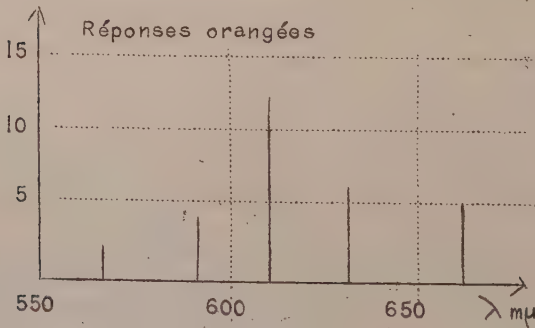
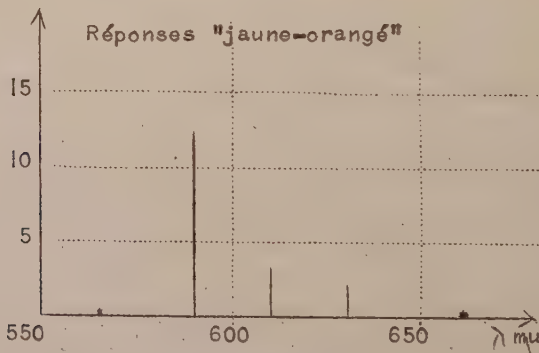
Longueurs d'onde	Orangé	Rouge <u>orangé</u>	Rouge orangé	<u>Rouge</u> orangé	Rouge
590	4	2	2	0	3
610	12	0	2	2	12
630	6	2	3	2	18
660	5	0	3	4	21

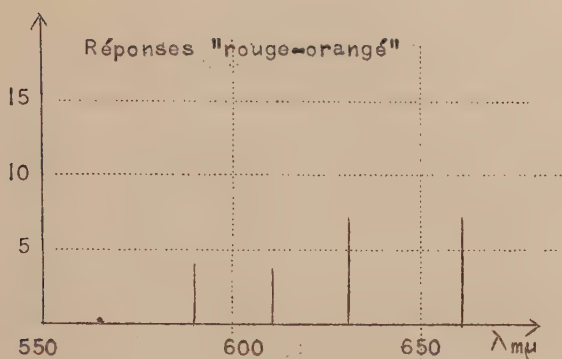
On voit, par ce tableau, qu'un nombre appréciable de sujets mettent dans cette sensation de couleur "chaude" une composante jaune, si l'on admet que l'orangé est un mélange de jaune et de rouge. Certes, nous avons signalé des difficultés expérimentales qui nous laissent à penser que notre courbe d'étalonnage du monochromateur présente une marge d'erreur relativement plus importante dans l'extrémité rouge du spectre. Mais, même en admettant une erreur par défaut de 20 m μ , ce qui nous semble énorme, pour la longueur d'onde 660 m μ nous tombons à 640 m μ , c'est-à-dire que nous sommes toujours dans le rouge. Une erreur d'étalonnage n'expliquerait donc pas de telles réponses. Il ne semble pas non plus que l'on puisse attribuer ces réponses rouge-orangées à de la lumière diffusée parasite provenant du monochromateur, et nous sommes amené à penser qu'il s'agit là d'un phénomène indépendant des erreurs expérimentales.

Les sujets auraient, pour la plupart, avant la sensation colorée rouge, une sensation psychologique de couleur "chaude" qu'ils nomment, suivant le cas, rougeâtre ou rouge-orangé. Cette sensation de couleur "chaude" semble répondre à un mélange soit de beaucoup de rouge et d'un peu de blanc, soit de

beaucoup de rouge et d'un peu de jaune. A moins, comme le prétendent BOLL et DOURGNON, que l'extrémité rouge du spectre ne soit pas, en réalité, "parfaitement rouge, mais d'un rouge tirant vers l'orangé : ce que nous appelons habituellement rouge franc, écrivent-ils, ne serait donc pas une couleur spectrale, mais un pourpre".

= Les réponses orangées situent leur valeur modale à 590 m μ . Le caractère asymétrique de la distribution orangée est marqué par un étalement important dans le domaine des rouges. Comme nous l'avons déjà signalé, ces réponses comportent, en plus des réponses orangées proprement dites, les réponses intermédiaires "jaune-orangé" et "rouge-orangé". Dans les diagrammes en bâtonnets ci-dessous, nous montrons l'exacte composition de ces réponses classées "orangées", en faisant figurer en ordonnées les fréquences absolues et en abscisses les longueurs d'onde.

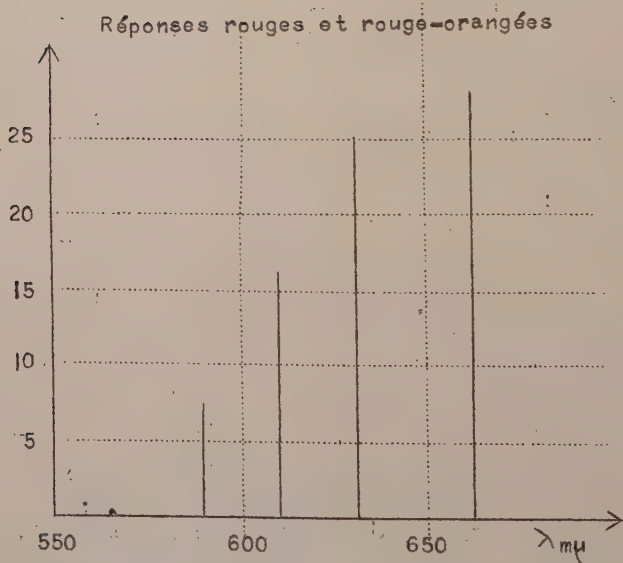
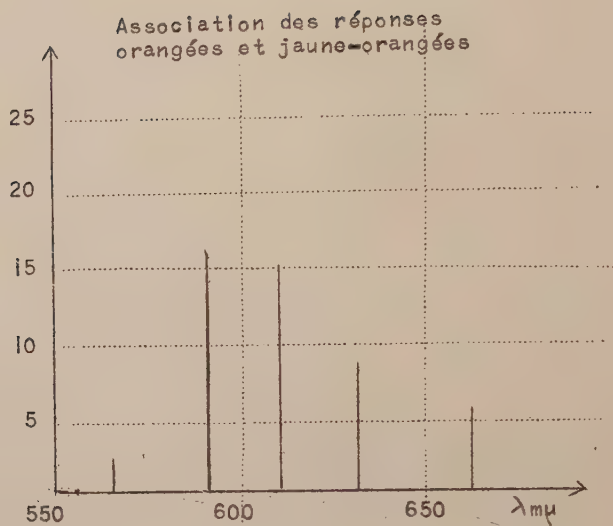




Est-il besoin de développer les renseignements qu'apportent ces tracés, et qu'importe, en somme, que la valeur modale des réponses "jaune-orangé" soit 590 mμ et que celle des réponses orangées proprement dites soit 610 mμ ? Par contre, deux remarques s'imposent :

- D'une part, les réponses orangées proprement dites restent très étalées et leur étalement se fait aussi bien vers les grandes que vers les courtes longueurs d'onde, avec cependant une prédominance pour l'extrémité rouge du spectre. Nous pensons que cet étalement caractérise la donnée psychologique particulière suivant laquelle l'orangé semble être, pour la plupart des sujets, une couleur qui résulte d'un mélange de jaune et de rouge.

- D'autre part, nous constatons que la répartition statistique des réponses "rouge-orangé" présente certaines analogies avec la distribution des réponses rouges. Ce fait vient à l'appui de ce que nous exposons au sujet de la sensation psychologique de couleur "chaude" et il nous semble plus rationnel de grouper les réponses "rouge-orangé" avec les réponses rouges. Les diagrammes ci-dessous donnent le résultat de cette opération et, de ce fait, les réponses rouges présentent, à 660 mμ, un effectif voisin du nombre d'observateurs entendus.



DISCUSSION DE NOS RESULTATS

Nous nous devons de faire remarquer que les résultats que nous avons recueillis au seuil chromatique et l'interprétation que nous avons été amené à leur donner sont en contradiction formelle avec les conclusions de SEGAL. Cet auteur, à la page 23 de son ouvrage sur le mécanisme de la vision des couleurs, remarque que le rouge spectral, même extrême, a une tonalité qu'il est possible de modifier par l'effet Bezold-Brücke. Admettant qu'une sensation correspondant à l'excitation isolée d'une fondamentale doit rester stable quelle que soit la luminance, il conclut que "le rouge pur est une nuance extra-spectrale". Cette conclusion, parfaitement logique, s'accorde bien avec le fait que le centre de confusion des protanopes (dichromates "aveugles" à la fondamentale rouge) se trouve en dehors du spectre visible et représente une couleur virtuelle pourprée.

SEGAL indique le "moyen de débarrasser la sensation" rouge que donne l'extrémité du spectre "de tout résidu dû à l'intervention d'autres récepteurs". Sa méthode consiste "à abaisser fortement" la luminance d'un rouge spectral. La composante verte devenant, alors, infra-liminaire, on isolerait la tonalité de la seule fondamentale rouge. On assiste, dit-il, à "un brusque changement de tonalité qui passe du rouge franc à une couleur lie-de-vin nettement pourprée" correspondant "à l'excitation sélective du récepteur rouge". Il précise que la même expérience est réalisable avec des couleurs rouge-orangées et même franchement orangées et qu'elle aboutit à un résultat identique bien que l'observation soit, ici, "plus délicate" à cause d'une participation plus importante du récepteur vert,

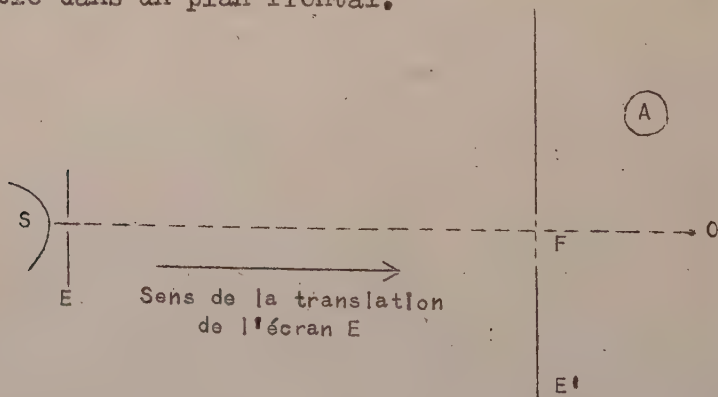
Dans ces conditions, nous aurions dû recueillir, au seuil chromatique, une grande majorité de réponses pourpres, au moins pour la longueur d'onde 660 mμ. Il n'en a rien été et nos observateurs nous

ont parlé d'une sensation de couleur "chaude" assez mal définie, mais qui serait plutôt d'un rouge-orangé. Cette contradiction entre nos résultats et ceux de SEGAL nous a d'autant plus inquiété que le raisonnement tenu par cet auteur est irréfutable.

La seule différence qui existe entre nos méthodes de détermination de la couleur au seuil, tient dans la manière d'atteindre ce seuil. Partant de l'obscurité totale après vingt minutes d'adaptation, nous faisons croître progressivement la luminance de notre plage colorée jusqu'à ce que nous obtenions la première sensation chromatique. SEGAL, au contraire, part d'une luminance déjà élevée et descend brutalement à un niveau liminaire. Cette différence de technique expérimentale pourrait expliquer les divergences de nos résultats. C'est pour vérifier cette possibilité que nous avons entrepris une brève série d'expériences complémentaires pour comparer les réponses obtenues suivant qu'on utilise l'un ou l'autre protocole expérimental.

MONTAGE EXPERIMENTAL

Sur un banc d'optique, sont placés successivement une source de lumière blanche S dont on peut faire varier la luminance à l'aide d'un alternostat, un écran E percé d'un orifice circulaire de trois centimètres de diamètre, un filtre interférentiel F enchâssé dans un autre écran E', une mentonnière O réglable dans un plan frontal.



Nous avons choisi un filtre donnant un rayonnement monochromatique de longueur d'onde $700 \text{ m}\mu$, avec une bande passante de $5 \text{ m}\mu$ seulement. L'observation a lieu en Maxwellian-View, et c'est le sujet lui-même qui fait croître la luminance de la couleur-film, ainsi obtenue, en manipulant l'alternostat A.

L'expérimentation se fait en trois temps :

- Dans le premier temps, l'observateur venant de l'extérieur ou d'une salle suffisamment éclairée recherche la première sensation colorée perçue, sans aucune adaptation préalable à l'obscurité.

- Une fois la couleur seuil nommée, on lui demande d'augmenter la luminance jusqu'à ce qu'il perçoive un rouge vif très intense. A ce moment, on lui fait baisser rapidement la luminance jusqu'à ce qu'il voie une plage homogène pourpre, et on déplace l'écran E, le long du banc d'optique, pour que la surface rétinienne éclairée devienne plus importante.

- Dans le troisième temps, on le laisse s'adapter vingt minutes à l'obscurité et, après adaptation complète, on lui demande de rechercher la couleur seuil.

Les résultats obtenus au cours de ces trois manipulations successives sont notés dans un tableau dressé préalablement et nous les développerons dans l'ordre suivant :

Nous parlerons d'abord de la deuxième manipulation qui correspond au protocole expérimental de SEGAL, puis nous grouperons la première et la troisième manipulation qui correspondent à l'expérimentation en lumière ascendante, avant et après adaptation à l'obscurité.

RESULTATS EN LUMIERE DESCENDANTE

Comme l'affirme SEGAL, nous avons pu vérifier sur 12 observateurs que le fait d'abaisser brutalement la luminance d'une lumière rouge suscite, à des niveaux légèrement supra-liminaires, une impression colorée pourprée. Pour vérifier que cette impression colorée n'était pas consécutive à un phénomène d'adaptation chromatique, dès que cette couleur pourpre était perçue de façon homogène, nous imprimions à l'écran E un mouvement de translation dirigé vers l'observateur. De cette manière, nous augmentions considérablement le champ et, par conséquent, la surface rétinienne éclairée.

S'il ne s'agit pas d'un phénomène d'adaptation chromatique, la sensation pourprée doit rester homogène et identique à elle-même. Dans le cas contraire, le sujet doit voir une zone centrale plus sombre, correspondant à la région rétinienne préalablement "fatiguée", entourée de rouge, correspondant à la surface de la rétine nouvellement stimulée.

Sur nos 12 sujets, nous avons recueilli 12 réponses spécifiant l'existence d'une image en co-carde dont le centre était soit pourpre (7 réponses), soit gris-violacé (3 réponses), soit gris-noir (2 réponses), et la périphérie d'un rouge vif très intense (sauf chez un observateur qui la qualifiait de rouge-orangé).

Il nous semble, par conséquent, que la sensation colorée pourpre, obtenue en lumière descendante suivant la technique de SEGAL, répond plus à un phénomène voisin des phénomènes d'adaptation chromatique qu'à la mise en évidence de la tonalité de la seule fondamentale rouge-pourprée. Il s'agirait même d'un phénomène plus compliqué, puisque nous n'avons obtenu que 2 réponses caractérisant le centre gris-noir auquel nous devons nous attendre dans le cas où il s'agirait d'adaptation chromatique. En effet, c'est par rapport au blanc qu'apparaissent les

"images consécutives" de couleur complémentaire à celle du stimulus adaptateur, et nous sommes ici dans le cas particulier où le sujet observe la couleur à laquelle il a été préalablement soumis. Les sensations "centrales" pourprées et gris-violettes laissent supposer qu'après avoir fatigué le récepteur rouge par une luminance élevée, le brusque passage à des niveaux liminaires libère les effets de la fondamentale violette qui pourrait avoir même dans le rouge une certaine sensibilité. Notons qu'il ne s'agit là que d'une interprétation possible donnée en première approximation et qui nécessiterait, pour être avancée avec plus de certitude, une étude expérimentale beaucoup plus minutieuse.

RESULTATS EN LUMIERE ASCENDANTE

Comme nous l'avons dit, nous avons étudié les phénomènes d'une part, sans aucune adaptation à l'obscurité, d'autre part après adaptation de vingt minutes.

= Lorsque le sujet n'est pas adapté à l'obscurité, ou qu'il vient d'une pièce suffisamment éclairée en lumière blanche, il semble que la perception de pourpre au seuil soit relativement facilitée. Sur nos 12 observateurs, nous avons obtenu 7 réponses pourpres, si l'on compte la réponse pourprée d'un sujet qui ne semblait pas faire très bien la distinction entre pourpre et rouge. Les 5 autres réponses sont successivement :

- rouge sale non pourpré,
- rouge foncé " " ,
- rouge,
- rouge-orangé,
- orangé.

En ce qui concerne les deux réponses rouge-orangé et orangé, il semble que nous ayons été en

présence de sujets vraisemblablement préadaptés à l'obscurité, puisque l'expérience a été effectuée aux environs de 18 heures. Chez l'un de ces sujets, l'éblouissement au rouge, suivi de l'extinction complète de la lumière et de la recherche, en lumière ascendante, du seuil chromatique, a permis de mettre en évidence un seuil d'un pourpre très profond. Nous avons répété cette expérience chez un autre observateur ayant préalablement vu du pourpre et le résultat a été identique. Cependant, les conditions particulières de ces deux expériences ne nous semblent pas, à notre avis, devoir permettre de les rattacher à la non-adaptation à l'obscurité, et il s'agirait plutôt, ici, d'un phénomène d'adaptation chromatique au rouge.

Dans l'ensemble, le pourcentage des réponses pourprées, recueillies au seuil chromatique, ne nous semble pas absolument significatif, et les trois sujets ayant répondu rouge ont catégoriquement rejeté la notion de pourpre. Cependant, à cette notion se rattache tout un complexe psychologique, et le mot pourpre semble éveiller immédiatement l'image d'une robe d'évêque, perçue dans une atmosphère déterminée, avec tous les reflets qui entachent la mémoire des couleurs de surface. Si nous admettons, dans ces conditions, que la notion de couleur pourpre est, pour beaucoup, mal définie lorsqu'il s'agit de lumières colorées et que des sujets non entraînés ont du mal à analyser une couleur-film pour lui découvrir une pointe de violet, nous pouvons conclure que les résultats obtenus sont en faveur de l'opinion de SEGAL : la première sensation colorée perçue à 700 mμ par un observateur non adapté préalablement à l'obscurité semble être un rouge plus ou moins pourpre.

= Lorsque le sujet est adapté à l'obscurité depuis une vingtaine de minutes, le seuil chromatique n'est pratiquement jamais pourpre, et alors entre en ligne de compte cette sensation mal définie de couleur "chaude" qui correspond, en fait, à une teinte rouge légèrement orangée. En effet, sur

nos 12 observateurs, nous n'avons obtenu que 2 réponses pourpres, dont l'une provient du sujet particulier que nous avons déjà mentionné et qui ne semble pas différencier le rouge du pourpre. Sa réponse "pourpre si l'on veut" est très significative ; il voulait s'en tenir à la réponse qu'il avait donnée lorsqu'il n'était pas adapté à l'obscurité. Nous avons, par ailleurs, recueilli :

- trois réponses orangées,
- cinq réponses rouge-orangées,
- une réponse rouge,
- une réponse "rouge avec un peu de jaune".

Dix sujets sur douze, à 700 mμ, après adaptation à l'obscurité, n'ont donc pas vu de pourpre, alors que, sans adaptation, beaucoup d'entre eux avaient donné des réponses pourpres. Nous pensons, par conséquent, que nos résultats sont confirmés par cette expérience complémentaire et qu'il est normal qu'à 660 mμ nous n'ayons recueilli aucune réponse pourpre.

Il est évident que cette différence des réponses suivant que le sujet est adapté ou non à l'obscurité tient aux phénomènes de l'adaptation temporelle. Le fait que nos résultats, dans les grandes longueurs d'onde, aient été troublés par ces phénomènes d'adaptation, ne donne que plus de poids à la mise en évidence d'une fondamentale violette.

Nous avons pensé, un moment, que la contradiction qui apparaissait entre nos conclusions et celles de SEGAL, à propos de l'extrémité rouge du spectre, mettait sa théorie en péril. Certes, il est clair que sa méthode de recherche des fondamentales en lumière descendante est une méthode à rejeter définitivement et qu'elle n'aboutit qu'à des phénomènes complexes qui sont loin de l'excitation préférentielle d'une fondamentale. Cependant, il semble exact, si l'on considère le centre de confu-

sion des protanopes, que la fondamentale de grandes longueurs d'onde est légèrement pourprée. Et nous devons reconnaître qu'il est possible d'expliquer, suivant la théorie de SEGAL, les différences que nous avons relevées entre les réponses des sujets qui étaient adaptés à l'obscurité et les réponses de ces mêmes sujets non adaptés. Nous exposerons, dans le paragraphe suivant, l'interprétation que l'on peut donner de ce phénomène, dans le cadre de sa théorie.

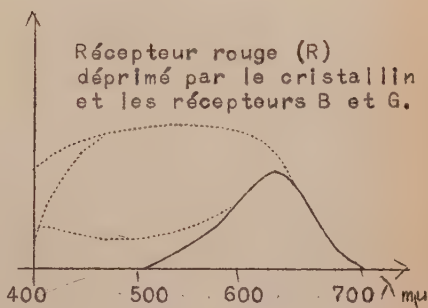
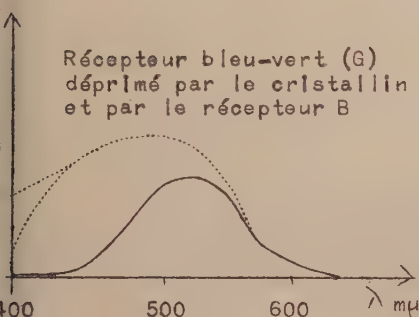
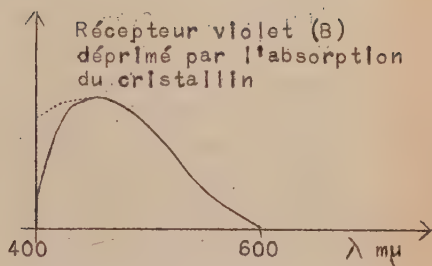
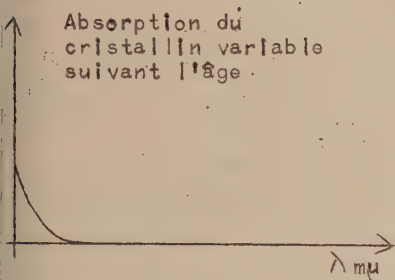
INTERPRETATION POSSIBLE EN THEORIE DE SEGAL

Un bref rappel de la théorie des trois couches est nécessaire pour rendre cette interprétation accessible au lecteur peu familier des hypothèses photochimiques. SEGAL, dans l'ordre suivant lequel la lumière les traverse, prête les propriétés que nous allons énumérer aux trois couches ci-après :

- La couche plexiforme externe, correspondant aux boutons synaptiques des cônes, représenterait le récepteur violet dont la courbe de sensibilité doit être corrigée par l'effet écran dû à l'absorption cristallinienne.

- La couche des segments externes des cônes représenterait le récepteur vert-bleu, dont le pigment photosensible est le pourpre rétinien. La courbe de sensibilité de ce récepteur serait déprimée par l'effet écran dû au cristallin et au récepteur violet ; elle verrait, de ce fait, son maximum décalé vers le vert.

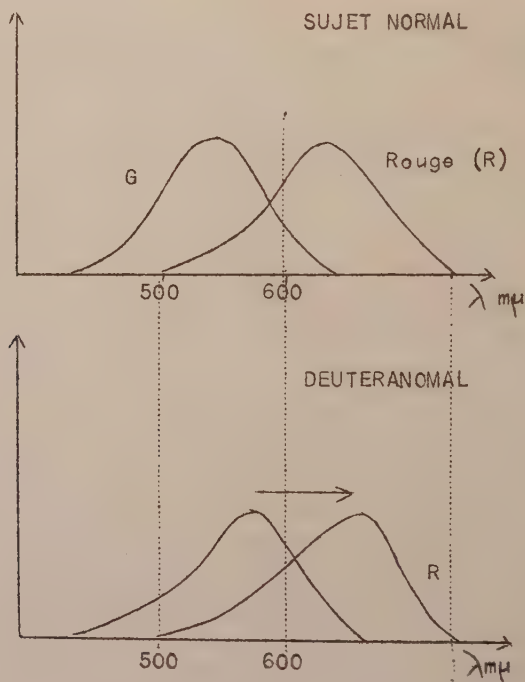
- L'épithélium pigmentaire représenterait le récepteur rouge-pourpré, dont le pigment serait du pourpre rétinien à une concentration si élevée que ce pourpre prendrait un aspect quasi solide.



A partir de cette théorie des trois couches, SEGAL explique de manière élégante les anomalies du trichromatisme et les relations qui existent entre ces anomalies et les dichromatismes. Il suppose seulement pour cela "un défaut ou un excès de concentration du pourpre dans les segments externes des cônes".

Considérons, par exemple, la deutéranomalie : elle serait due à une augmentation relative de la concentration du pourpre rétinien dans la couche des segments externes des cônes. La sensibilité du récepteur bleu-vert verrait, alors, son maximum encore plus décalé vers les grandes longueurs d'onde. En effet, vers les courtes longueurs d'onde, la courbe de sensibilité de ce récepteur resterait déprimée par l'effet écran du cristallin et du récepteur violet. Par contre, ce décalage de la sensi-

bilité du récepteur bleu-vert vers les lumières plus rouges entraînerait, par l'effet écran, une déformation de la courbe de sensibilité du récepteur rouge, et cette dernière verrait, elle aussi, son maximum décalé vers l'extrémité rouge du spectre. La vision colorée serait, de ce double fait, perturbée et le rouge proche pourrait être perçu, à cause d'une plus grande participation de la fondamentale verte, comme légèrement orangé.



Représentation schématique
permettant de montrer qualitativement
la théorie de la deutéranomalie
suivant SEGAL.

Il est fort probable que les sujets, lorsqu'ils s'adaptent à l'obscurité, augmentent progressivement la concentration du pourpre rétinien dans les segments externes de leurs cônes. Les fondamentales rouges et vertes voient, dans le cadre de la théorie de SEGAL, leur maximum de sensibilité décalé vers les grandes longueurs d'onde, et les sujets normaux doivent tendre à se comporter comme des deutéranomaux. On conçoit, alors, que cette deutéranomalie passagère et provoquée par l'adaptation à l'obscurité leur fasse interpréter, au seuil chromatique, des lumières rouges assez proches, comme ayant une tonalité rouge-orangée et non plus rouge-pourprée.

Bien entendu, il ne s'agit là que d'une interprétation possible ; mais elle est d'autant plus intéressante qu'elle nous amène à comprendre pourquoi la distribution des réponses vertes (le vert étant supposé caractériser la tonalité de la deuxième fondamentale) présente, au seuil, une asymétrie. Si nous négligeons, en effet, les réponses vertes recueillies en deçà de 450 mμ et qui correspondent à la dénomination particulière "violet-vert" déjà interprétée, l'ensemble des réponses vertes semble décalé vers les grandes longueurs d'onde.

Nous avons calculé la moyenne de ces réponses, au seuil, entre 460 et 570 mμ, en éliminant volontairement l'unique réponse verte donnée à 590 mμ pour nous mettre dans les conditions les plus défavorables, et nous avons comparé cette moyenne à la moyenne de la distribution verte en vision photopique. Ce calcul nous a montré une quasi-identité entre ces deux moyennes, puisqu'elles se situent toutes deux au voisinage de 523 mμ. Pourtant, malgré cette identité des moyennes, le déplacement net de la valeur modale des réponses liminaires vers les grandes longueurs d'onde et l'existence d'une forte dyssymétrie sont probablement significatifs. Ce caractère significatif, si l'on tenait compte d'une interprétation possible par des phénomènes psychologiques du nombre important de réponses vertes du côté des courtes longueurs d'onde et si l'on faisait abstraction de cette "traînée", apparaîtrait,

sans doute, plus nettement. La courbe représentant l'excitation de la fondamentale verte serait, dans ces conditions, décalée vers les grandes longueurs d'onde de façon appréciable, marquant le comportement de deutéranomal des sujets adaptés à l'obscurité. Notons, cependant, qu'il s'agit, là, d'une considération très hypothétique puisque, à notre connaissance, les critères statistiques habituels n'envisagent pas de tests de signification pour des moments d'ordre supérieur à 2.

EN CONCLUSION, nous pouvons dire que cette étude nous a apporté un certain nombre de satisfactions :

- d'une part, elle a mis en évidence la supériorité de la méthode de recherche du seuil chromatique en lumière ascendante. Le protocole expérimental adopté par SEGAL ne semble l'avoir conduit, en effet, aux résultats exacts que parce qu'il a commis involontairement une erreur d'interprétation.

- D'autre part, elle a permis de mettre le doigt sur l'importance des phénomènes d'adaptation au cours d'expériences de ce type et d'émettre l'hypothèse très vraisemblable qu'un sujet normal adapté à l'obscurité se comporte, vis-à-vis des lumières colorées, comme s'il était deutéranomal.

- Enfin, nous avons pu, par notre étude complémentaire, résoudre la question qui se posait à propos de la fondamentale de grande longueur d'onde. Cette fondamentale est probablement un peu pourprée, mais il est normal qu'après adaptation à l'obscurité cette sensation pourprée ne se retrouve pas. Par ailleurs, en ce qui concerne la deuxième fondamentale, si notre interprétation est exacte, elle ne peut qu'avoir la tonalité verte.

CHAPITRE VIII

INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS EN VISION PHOTOPIQUE

INTRODUCTION

L'ensemble des réponses colorées de nos observateurs à la fin de l'intervalle photochromatique se caractérise par une certaine imprécision. Celle-ci se traduit, pour chaque distribution, par une forte dispersion, et les interprétations que nous avons données à nos histogrammes peuvent toujours, de ce fait, être discutées.

C'est pour contrôler nos dires et tenter d'éclaircir quelques points que nous avons tenu à étudier les réponses recueillies à la tension maxima de notre monochromateur. De cette manière, nous pensons être en vision franchement photopique et éviter toute critique valable quant à la différence des niveaux lumineux pour deux rayonnements monochromatiques quelconques.

Nous avons déjà précisé que l'écart type de nos distributions décroît régulièrement lorsque nous augmentons la luminance de notre plage colorée. Cependant, pour atteindre à une plus grande exactitude, nous n'avons pas hésité à compléter le nombre de nos observateurs à 45. Il faut, néanmoins, signaler que, dans le domaine des grandes longueurs d'onde, nous avons préféré limiter notre étude à 17 sujets, pour éviter l'apparition de phénomènes de fatigue, parti-

culièrement favorisés par les lumières de longueur d'onde 590, 610, 630 et 660 m μ . Il s'agit, évidemment là, d'un choix un peu arbitraire ; mais nous pensons qu'une étude précise, dans ces régions, doit faire appel, comme dans le spectre des courtes longueurs d'onde, à des rayonnements monochromatiques plus rapprochés les uns des autres et présentant le même intervalle de classe.

Pour reprendre l'ordre suivi lorsque nous avons exposé nos résultats, nous tâcherons de donner une interprétation à nos diagrammes en commençant par l'extrémité rouge du spectre.

ESSAI D'INTERPRETATION

= Les réponses rouges, bien que recueillies seulement auprès de 17 observateurs, présentent les caractéristiques que nous leur avons décrites au seuil chromatique. Leur fréquence absolue croît très rapidement avec la longueur d'onde, et, en vision photopique, cette fréquence égale le nombre de sujets entendus pour la lumière de longueur d'onde 660 m μ . Il est logique de penser que, pour les rayonnements de longueurs d'onde supérieures, la fréquence absolue des réponses doit rester à sa valeur maxima. Ce fait met bien en évidence le caractère unitonal de cette couleur, et l'écart type de la distribution, si elle était complète, ne pourrait être que très important.

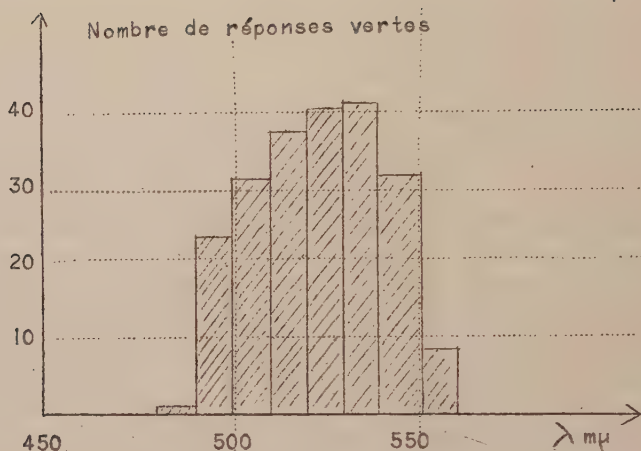
= Les réponses orangées, comme nous l'avons déjà fait remarquer, se répartissent suivant une distribution uni-modale, étant donné qu'à 565 m μ la fréquence absolue de telles réponses est nulle. Il est évident que leur écart type doit être relativement faible et qu'en vision photopique le domaine orangé est très limité.

= Les réponses jaunes se caractérisent par

quelques points qui nous précisent, seulement, les limites extrêmes de la distribution statistique des jaunes. Ces limites extrêmes sont très resserrées en longueurs d'onde et nous en déduisons que la dispersion de ces réponses est très faible. Ce caractère groupé nous indique que la couleur jaune franc n'est perçue que dans un domaine restreint du spectre visible. Le jaune est donc une couleur très précise pour la grande majorité des sujets, et c'est cette précision qui explique le caractère de simplicité psychologique qu'il revêt. Nous devons, de ce fait, nous attendre à ce que toute autre couleur qui serait caractérisée par une très faible dispersion soit, si notre interprétation est correcte, une couleur psychologiquement simple.

= Les réponses vert-jaunes se répartissent, elles aussi, suivant une distribution à un seul maximum évident et, bien que notre histogramme soit incomplet, nous pouvons affirmer que leur dispersion doit être plus importante que la dispersion des réponses jaunes.

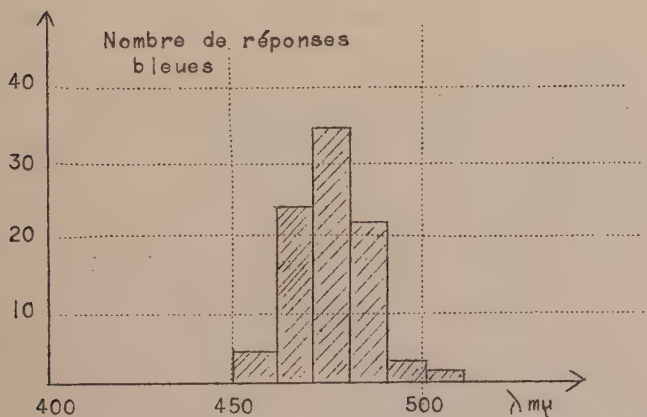
= Les réponses vertes sont très intéressantes à étudier, et nous reproduirons ici l'histogramme qui les résume. Elles présentent un écart type de valeur manifestement élevée et des fréquences absolues maxima voisines du nombre d'observateurs entendus. Ce dernier caractère suggère un rapprochement à faire entre les deux distributions verte et rouge. Or, nous avons dit, pour la couleur rouge, qu'il mettait bien en évidence ce que l'on appelle l'unifonctionnalité des lumières considérées. Cependant, si nous nous reportons à la courbe de sensibilité différentielle le long du spectre, établie par WRIGHT et PITT, nous constatons que le vert, contrairement au rouge, n'est pas une couleur unifonctionnelle et présente, seulement, un maximum relatif encadré par les minima du bleu-vert et du jaune-orangé. Il y a donc une autre cause à la similitude de ces deux distributions et c'est cette cause que nous allons tenter de mettre en évidence.



Considérant, en effet, le problème de plus près, nous ne pouvons interpréter la forte dispersion des réponses vertes qu'en admettant l'existence, même en vision photopique, d'une excitation préférentielle d'un seul récepteur : le récepteur vert. C'est l'opposition qui existe entre le fait que cette couleur ne soit pas uni-tonale et le fait qu'elle constitue, néanmoins, dans un domaine étendu de longueur d'onde, à peu près l'unique réponse colorée de nos observateurs, qui nous conduit à adopter cette interprétation. La similitude entre les distributions verte et rouge, tant en ce qui concerne les effectifs élevés que la dispersion des réponses, s'en trouve éclaircie, si l'on admet avec la plupart des auteurs que la première fondamentale est rouge. Il faut noter, cependant, que cette similitude n'est pas une identité puisque, jamais, pour les réponses vertes, nous n'avons de fréquence absolue égale au nombre d'observateurs. Nous proposons, pour concevoir ce phénomène, d'émettre l'hypothèse que ces légères différences tiennent au fait que le vert n'est pas une couleur unitonale. La distribution des rouges traduirait alors deux faits simultanément associés : l'unitonalité de cette couleur qui, en même temps, est une fondamentale.

= Les réponses bleu-vert, de valeur modale de 585 m μ , se présentent sous la forme d'une distribution asymétrique relativement dispersée, mais dont les fréquences absolues sont, dans l'ensemble, peu élevées. On pourrait discuter, pour cette couleur, la possibilité de représenter la tonalité d'une fondamentale ; mais l'aspect de l'histogramme que nous venons de décrire incite à quelques réserves. Nous ne suivrons donc pas JUDD et SEGAL sur cette voie, et ceci d'autant plus qu'une importante fraction de nos sujets dénomme vertes les lumières de longueur d'onde comprise entre 500 et 510 m μ .

= Les réponses bleues ont une valeur modale (475 m μ) correspondant à des effectifs élevés, leur dispersion est manifestement très faible, et nous avons tendance à rapprocher cette couleur du jaune.

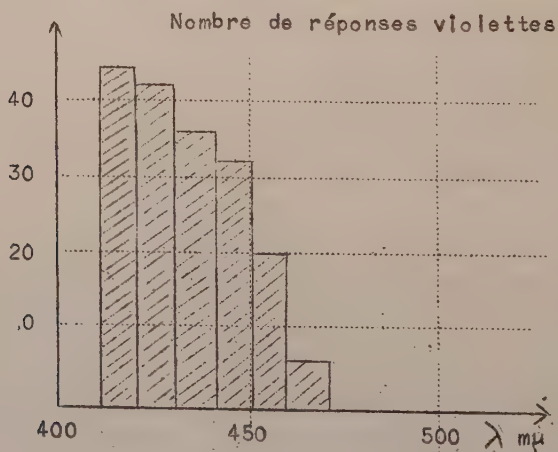


Il faut dire que le bleu est une couleur psychologiquement simple, au même titre que le jaune, et l'accord qui se trouve ainsi réalisé nous renforce dans l'idée que notre interprétation est correcte. Nous avons pensé, en effet, à propos du jaune, que toute distribution à faible dispersion traduit le caractère psychologiquement simple de la couleur étudiée, et ce que nous venons de constater

pour le bleu est très satisfaisant.

= Les réponses bleu-violet, comme les réponses bleu-vert, se présentent sous la forme d'une distribution unimodale légèrement asymétrique et dont les effectifs sont peu importants. Il ne semble pas indiqué, de ce fait, d'attribuer au bleu-violet la tonalité de la fondamentale de courte longueur d'onde. En outre, si l'histogramme des réponses bleu-violet se caractérise par une dispersion plus grande que celle des réponses bleues, cette dispersion est néanmoins trop faible pour suggérer l'idée qu'il s'agit d'une fondamentale.

= Les réponses violettes se distribuent de manière superposable aux réponses rouges. En effet, comme pour la distribution des rouges, au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'extrémité du spectre, on observe des effectifs de plus en plus élevés, qui tendent à égaler le nombre total d'observateurs. Cette similitude, encore plus poussée que celle que nous avons notée entre les distributions rouge et verte, nous conduit à admettre que la couleur unitonale violette est bien la fondamentale de courte longueur d'onde.



CONCLUSION

Au terme de cette étude toute qualitative des distributions obtenues en vision photopique, nous sommes donc amené à confirmer les interprétations que nous avons données au seuil : le vert, en particulier, est la couleur qui correspond à la deuxième fondamentale.

Par ailleurs, il semble que, statistiquement, les réponses, correspondant à la tonalité des fondamentales, se distribuent de façon assez caractéristique avec un écart type important et des effectifs élevés. Par contre, pour les couleurs non fondamentales, les distributions revêtent un aspect manifestement unimodal et leur dispersion est d'autant plus faible qu'elles paraissent psychologiquement plus simples. Il y aurait donc deux types bien différents de distributions.

On pourrait nous opposer, cependant, qu'il ne s'agit là que de considérations qualitatives et qu'on préférerait pouvoir contrôler nos dires à l'aide de données statistiques quantitatives. C'est pour répondre à cette objection que nous aborderons, dans le chapitre suivant, une étude statistique quantitative qui fournira au lecteur des moyennes et des écarts types chiffrés. En même temps, nous tenterons de vérifier, à l'aide de méthodes précises, l'existence ou la non-existence de deux types de distribution bien différents.

CHAPITRE : IX

ETUDE STATISTIQUE DES REPONSES EN VISION PHOTOPIQUE

INTRODUCTION

L'aspect général des résultats, en vision nettement supra-liminaire, nous a suggéré l'idée que la répartition des réponses se faisait suivant deux grands types de distribution. Pour certaines couleurs, il semble que l'on ait affaire à des distributions normales, tandis que, pour d'autres, il semble que l'on ne puisse parvenir à ajuster une courbe de Laplace-Gauss.

Signalons, dès à présent, que nous n'accordons pas, à la distribution gaussienne, de valeur particulière sur le plan physiologique. En effet, des transformations mathématiques bien choisies peuvent rendre normales des distributions qui ne le sont pas a priori. Par ailleurs, nos histogrammes ont été établis en fonction de la longueur d'onde et nous n'ignorons pas que la longueur d'onde est dépourvue de toute signification physiologique.

Ce que nous avons voulu mettre en évidence par l'étude statistique qui va suivre est simplement l'existence ou la non-existence de deux types de répartitions statistiques. Il se trouve qu'en fonction de la longueur d'onde, une différence semble exister a priori ; mais, étant donné que, dans notre esprit, l'étude que nous allons entreprendre, ici,

ne consiste qu'à rechercher une confirmation ou une infirmation de nos dires, nous n'aurions pas hésité, dans le cas où une telle différence n'avait pas sauté aux yeux, à recourir à des transformations mathématiques pour la faire apparaître.

On aurait pu, en effet, étudier les distributions des réponses en fonction de la fréquence ou même du quantum des radiations monochromatiques utilisées, et observer, par exemple, deux types différents de distribution dont aucun n'aurait l'aspect normal. Dans ce cas, étant donné les propriétés de la courbe de Laplace-Gauss sur le plan statistique, nous aurions cherché la transformation mathématique, quelle qu'elle soit, qui aurait permis à l'une des répartitions statistiques de devenir gaussienne.

TECHNIQUE D'AJUSTEMENT d'une distribution normale à une distribution réelle :

Nous ne nous étendrons pas sur les divers calculs que nous avons dû effectuer pour savoir s'il était possible de considérer certaines de nos distributions expérimentales comme normales. Ces calculs sont présentés dans les tableaux que nous donnons après la bibliographie, et nous nous contenterons, ici, d'un exposé qui permette seulement de lire ces tableaux.

Nous avons d'abord recherché la moyenne et l'écart type de nos différentes distributions par la méthode de la moyenne provisoire. Suivant cette méthode, $\sum y$ représentant la somme des fréquences absolues observées, Δ l'écart entre la moyenne provisoire A et les différents points médians x , i la valeur de l'intervalle de classe, on a respectivement :

Le correctif de la moyenne :

$$\delta i = i \frac{\sum x \Delta}{\sum y}$$

La moyenne réelle : $m = A + \delta i$.

L'écart type de la distribution :

$$\sigma = \pm i \sqrt{\frac{\sum y \left(\frac{\Delta}{i}\right)^2 - \delta \sum y \frac{\Delta}{i}}{\sum y - 1}}$$

Nous avons ensuite considéré les courbes normales ayant même moyenne m , même écart type, σ , et même effectif total, $\sum y$, que nos distributions expérimentales, c'est-à-dire les courbes de la forme:

$$N = \frac{\sum y}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda - m)^2}{2\sigma^2}}$$

Pour pouvoir passer par la table de la courbe normale réduite, nous avons calculé les abscisses réduites des limites de classe L de nos distributions réelles suivant la relation

$$\mathcal{X} = \frac{L - m}{\sigma}$$

La table des aires de la courbe normale nous donne alors, pour chaque valeur de $\mathcal{X}$ la proportion $\Theta(\mathcal{X})$ de l'aire comprise entre les abscisses réduites $-\mathcal{X}$ et $+\mathcal{X}$. La colonne $\Delta\Theta$ porte les différences entre deux valeurs successives de $\Theta(\mathcal{X})$. La valeur $\Delta\Theta/2$ correspond à la fréquence relative de chaque classe et la colonne

$$y' = \sum y \cdot \frac{\Delta\Theta}{2}$$

donne les fréquences théoriques cherchées.

Une fois ces fréquences absolues théoriques obtenues, il faut les comparer aux fréquences absolues réellement observées pour savoir s'il y a ou non, entre les résultats expérimentaux et les résultats calculés, une différence statistiquement signi-

ficative.

Pour cette recherche, nous avons utilisé le test du χ^2 . Ce test consiste à étudier le quotient $\sum \frac{(y - y')^2}{y'}$ par rapport au paramètre théorique χ^2 correspondant à un coefficient de sécurité de 95 %, pour un certain degré de liberté ν . Les valeurs du paramètre χ^2 sont données en fonction de ν par des tables, et l'on admet que la différence entre les fréquences expérimentales et les fréquences théoriques n'est pas significative, avec 95 % de chances de ne pas se tromper si

$$\sum \frac{(y - y')^2}{y'} < \chi^2$$

Chaque fois qu'on aboutit à un tel résultat, il est possible d'ajuster à la distribution expérimentale une distribution normale de Laplace-Gauss. On peut même, alors, représenter graphiquement la courbe normale ajustée si l'on prend soin de compléter nos tableaux par le calcul des abscisses réduites X' des points médians expérimentaux, suivant la relation

$$X' = \frac{x - m}{\sigma}$$

A ces abscisses réduites, correspondent les ordonnées Y de la courbe normale réduite et les valeurs $Y' = Y \sum \frac{y}{\sigma}$ représentent les ordonnées de la courbe normale ajustée.

RESULTATS OBTENUS

Nous n'avons fait porter nos efforts que sur les distributions précises que nous avions à notre disposition, c'est-à-dire sur les histogrammes des réponses vertes, bleu-vert, bleues, bleu-violet.

Dans l'extrémité violette et dans l'extrémité rouge du spectre, en effet, nos diagrammes sont incomplets puisque nous n'avons pas soumis à l'appréciation de nos observateurs, d'une part des longueurs d'onde inférieures à 415 mμ, d'autre part des rayonnements de longueurs d'onde supérieures à 660 mμ. Il en est de même des réponses vert-jaunes, jaunes et orangées qui n'ont pas fait l'objet de nos préoccupations, ici, pour des raisons qui tombent sous le sens et qui ont déjà été amplement développées.

= Les réponses bleu-violet sont centrées sur une longueur d'onde $\bar{\lambda} = 451,7$ mμ avec un écart type $\sigma = \pm 13,2$. On peut ajuster à cette distribution expérimentale une distribution normale puisque $\sum \frac{(y - y')^2}{y'}$ est égal à 3,822 alors que, pour $\nu = 6$, $\chi^2 = 12,59$.

= Les réponses bleues ont une moyenne $\bar{\lambda} = 475,3$ mμ et un écart type $\sigma = \pm 9,56$ mμ. Ce faible écart type caractérise, pour nous, la simplicité psychologique du bleu. Par ailleurs, le quotient $\sum \frac{(y - y')^2}{y'}$ = 3,036 est très inférieur au χ^2 , qui a pour valeur 11,07, quand le degré de liberté est $\nu = 5$, avec un coefficient de sécurité de 95 %. On peut donc ajuster très facilement une courbe de Laplace-Gauss à notre distribution des réponses bleues.

= Les réponses bleu-vert ont pour moyenne $\bar{\lambda} = 496,1$ mμ et pour écart type $\sigma = \pm 14,42$ mμ. Malgré cet écart type $\sum \frac{(y - y')^2}{y'}$ < χ^2 . En effet, le quotient $\sum \frac{(y - y')^2}{y'}$ a une valeur de 5,5928, alors que pour $\nu = 6$ le χ^2 théorique vaut 12,59. Il n'y a donc pas de différence statistiquement si-

gnificative entre la distribution expérimentale et la distribution normale que l'on peut y ajuster.

= Les réponses vertes, au nombre de 222, ont pour moyenne $\lambda = 523,5$ mμ avec un écart type très important, puisque $\sigma = \pm 16,24$ mμ. Le quotient $\sum \frac{(y-y')^2}{y!}$, où y représente les fréquences absolues expérimentales et y' les fréquences absolues théoriques, a une valeur de 20,0319. Or, pour le degré de liberté $\nu = 7$, $\chi^2 = 14,07$ avec un coefficient de sécurité de 95 %. Il s'ensuit qu'il n'est pas possible d'ajuster une distribution normale à la répartition statistique des réponses vertes.

INTERET DE CES RESULTATS

Le fait que la distribution statistique des réponses vertes ne suive pas une loi normale, contrairement aux réponses bleu-violet, bleues, et bleu-vert, apporte la confirmation qu'il existe deux types de répartition absolument différents. L'interprétation qualitative que nous venons de donner au chapitre précédent s'en trouve justifiée. En effet, si nous comparons les histogrammes des réponses bleues et vertes, leur différence nous conduit à penser que, si l'une de ces couleurs est fondamentale, l'autre ne peut pas l'être, car toutes deux revêtent un caractère de simplicité psychologique. Nous pensons que ce caractère n'apparaît pas dans la répartition statistique des réponses vertes, parce que justement le vert est une couleur fondamentale. Il en résulte que nous attribuons aux distributions ayant le même aspect que la distribution verte des propriétés voisines, et aux distributions semblables à la répartition statistique des réponses bleues des caractéristiques communes.

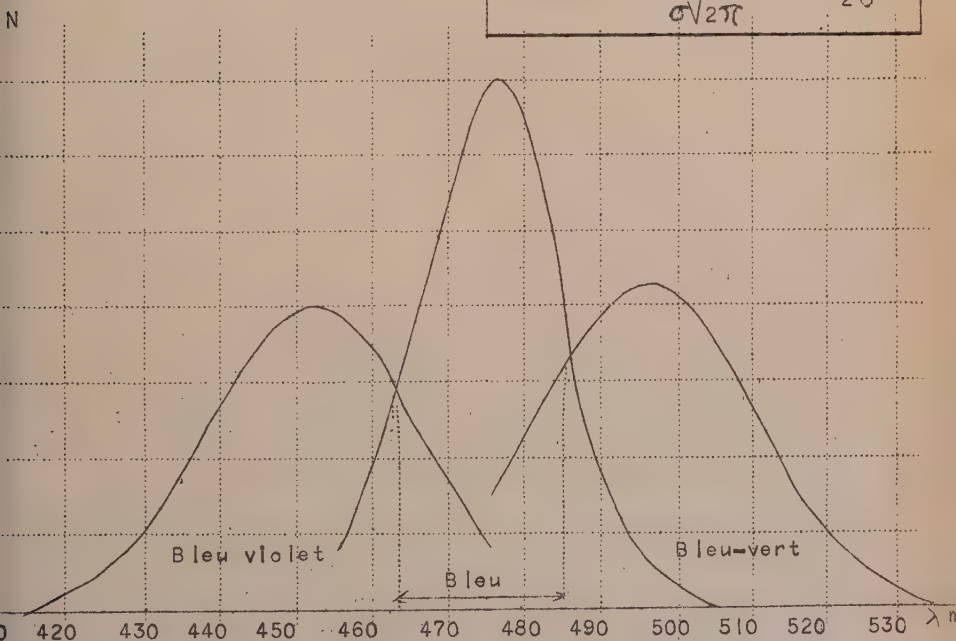
Nous en concluons que trois couleurs seulement peuvent être fondamentales : le violet, le vert et

le rouge. Deux autres couleurs sont particulières, parce que psychologiquement simples : le jaune et le bleu, dont la répartition statistique se caractérise par des écarts types extrêmement réduits. Quant aux couleurs intermédiaires du type "bleu-violet ou bleu-vert", elles se différencient de la couleur bleue par une plus forte dispersion des réponses.

°
° °

Dans un autre ordre d'idées, nous donnons, à titre comparatif, sur le même diagramme, les courbes normales ajustées aux réponses bleues, bleu-vert et bleu-violet. Les points communs existant entre le bleu-violet et le bleu d'une part, entre le bleu-vert et ce même bleu d'autre part, limitent

$$\text{Courbes } N = \frac{\sum y}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda-m)^2}{2\sigma^2}}$$



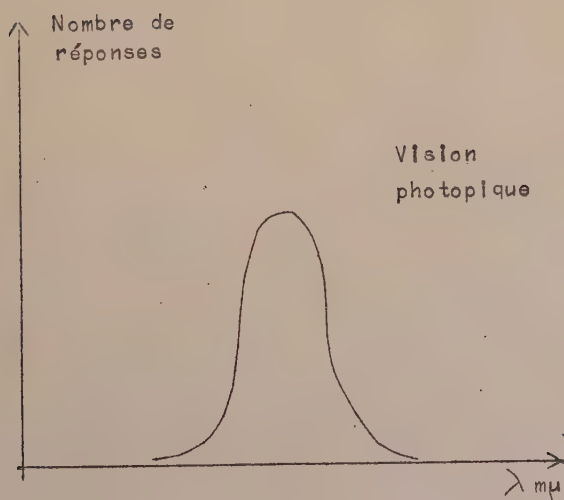
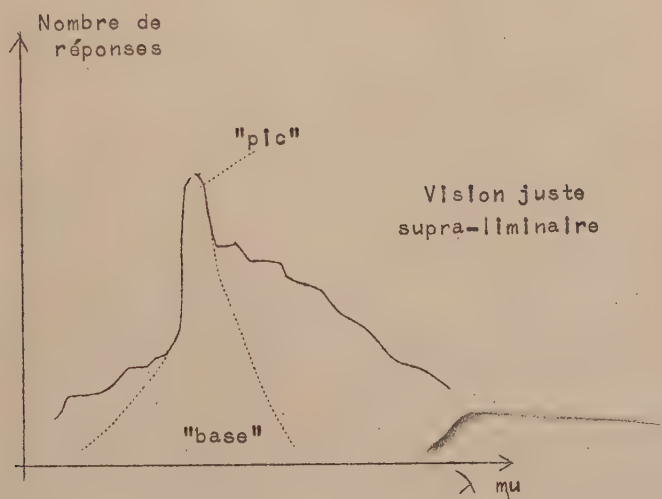
en abscisses le domaine de longueurs d'onde correspondant à la sensation bleue. On constate que cet espace est relativement réduit puisqu'il s'étend entre 462,5 mμ et 486,5 mμ. Il y a là une méthode de détermination des rayonnements visibles qui caractérise psychologiquement une couleur donnée. Cependant, nous sommes obligé de constater que nos résultats, en ce qui concerne les limites du bleu, ne concordent pas avec ceux obtenus par divers expérimentateurs comme Von Bezold, Weld, Verbeek, pour ne citer qu'eux. Nous pensons que cette discordance tient à la souplesse de notre méthode, qui laissait aux observateurs la possibilité de qualifier leurs sensations colorées par des réponses intermédiaires du type bleu-violet, bleu-vert, etc... A notre avis, en effet, le fait de rejeter toute couleur intermédiaire introduit un arbitraire supplémentaire dans la détermination déjà un peu arbitraire des limites spectrales d'une couleur. Nous nous rangerons donc à l'opinion de ceux qui pensent que la couleur bleue se situe pratiquement autour de 475 mμ et ceci, avec d'autant moins de doutes que notre méthode nous a permis de mettre en évidence le caractère psychologiquement simple de cette couleur.

°
° °

L'intérêt de l'étude que nous venons de faire apparaît en outre dans la comparaison des résultats obtenus au seuil à ceux recueillis en vision photopique. En effet, cette comparaison nous montre que nous n'avons pu ajuster, en vision photopique, de courbes de Laplace-Gauss, qu'aux distributions qui, au seuil, ont un aspect assez particulier.

La courbe de répartition statistique de telles réponses colorées présente un maximum très marqué et une forte dispersion. Ce caractère dispersé apparaît d'ailleurs, de façon relativement inusitée, puisqu'il se signale par un contraste : les réponses sont très étalées en longueurs d'onde, mais les fréquences absolues observées de part et d'autre du mode ont

relativement peu de poids. Dans l'ensemble, on peut dire que ces tracés comportent, comme le montre le schéma ci-après, une "base" caractérisée par de faibles fréquences, sur laquelle se greffe un "pic".
Tout semble indiquer que les sujets, au voisinage du seuil, utilisent, pour leurs réponses, deux critères très différents, alors qu'en vision photopique, ils utilisent toujours le même critère.



Pour s'en convaincre, il suffit de comparer les distributions statistiques obtenues au seuil à celles répondant à des niveaux nettement supra-liminaires. C'est le cas des deux répartitions statistiques des réponses bleues ; c'est le cas, aussi, de façon moins nette, des réponses bleu-violet et bleu-vert. C'est le cas, enfin, des réponses jaunes, vert-jaunes et orangées proprement dites, si nous admettons, comme nous avons de fortes raisons de le penser, qu'en vision photopique ces distributions sont normales.

Une telle constatation nous a poussé à penser qu'au seuil, la répartition statistique des réponses pour les couleurs non fondamentales se caractérise par l'association de deux distributions, dont l'une, au moins, est gaussienne. A cette distribution normale serait dû le "pic" qui représenterait les réponses émises en fonction de critères physiologiques. A l'autre distribution, correspondrait la "base" qui représenterait les réponses données en fonction de critères psychologiques. Cette "base" doit normalement disparaître lorsque, la luminance étant suffisante, disparaît l'incertitude. C'est ce qui expliquerait qu'en vision photopique, seule persiste la distribution normale répondant à des critères physiologiques. Bien entendu, il ne s'agit là que d'une interprétation possible qui, pour nous, a l'avantage d'expliquer un certain type de réponses et qui nous paraît, dans ce cas, logiquement justifiée.

En ce qui concerne l'autre type de réponses, celui pour lequel, en vision photopique, on n'obtient pas de distributions normales, nous pensons qu'il caractérise les fondamentales. Si nous comparons la répartition statistique des réponses colorées obtenues au seuil chromatique, pour ces couleurs fondamentales, à celles recueillies en vision nettement supra-liminaire, nous constatons des différences importantes. Même ^{avec} les réponses rouges qui, au seuil, suivent une répartition pratiquement photopique, parce que l'intervalle photochromatique est

presque inexistant dans cette région du spectre, nous avons, pour les fondamentales, des dispersions plus importantes. Nous interprétons ce fait comme caractérisant l'excitation préférentielle de la fondamentale au voisinage du seuil.

EN CONCLUSION :

L'imprécision des réponses obtenues à la fin de l'intervalle photochromatique tient, outre les phénomènes d'adaptation, à deux faits :

- Pour les couleurs non fondamentales, des interprétations psychologiques se superposent aux phénomènes physiologiques.

- Pour les fondamentales, aux réponses colorées normales en vision photopique, s'associe, au seuil, le phénomène de l'excitation préférentielle de ces récepteurs.

Ces deux sortes de phénomènes perturbent suffisamment les histogrammes pour que l'interprétation des réponses colorées au seuil devienne très délicate. On les élimine progressivement en augmentant la luminance et l'étude des distributions en vision photopique permet de contrôler le bien-fondé de nos conclusions.

CONCLUSIONS

Nous avons entrepris ce travail pour contribuer tant soit peu à la détermination de la fondamentale de courte longueur d'onde. Sur le plan très général de la trichromie visuelle, cette détermination ne présente qu'un intérêt mineur, puisque "les trois types différents d'appareils sensoriels" peuvent rester indéterminés pour la majorité des calculs de colorimétrie. Cependant, sur le plan des théories de la vision des couleurs, lorsqu'on veut avoir une vue générale des phénomènes normaux et aberrants dont les mécanismes de la vision colorée peuvent être le siège, une telle détermination est intéressante.

Nous avons commencé par une étude statistique de la sensation chromatique au voisinage du seuil, parce qu'on a toujours supposé qu'à ces niveaux de luminance les fondamentales étaient pratiquement seules excitées. Les résultats obtenus nous ont amené à réviser cette opinion. En effet, sur les réponses correspondant à l'excitation préférentielle des fondamentales, se greffent de nombreuses réponses faisant appel à des données psychologiques.

Par ailleurs, nous avons montré qu'il est impossible de donner une interprétation satisfaisante aux distributions obtenues, si la fondamentale de courte longueur d'onde est bleue. Par contre, si l'on admet qu'elle est violette, il est

possible d'expliquer rationnellement les réponses recueillies. Nous avons donc conclu que la longueur d'onde dominante de la troisième fondamentale se situe dans le violet, et cette conclusion nous semble confirmée par l'étude statistique des réponses en vision photopique.

Le problème de la réalité de l'indigo pourrait être relié à l'existence, en vision photopique, chez quelques sujets, d'un reliquat du phénomène de l'excitation préférentielle des fondamentales violettes et vertes, observé au seuil chromatique.

Pour contrôler, dans les grandes longueurs d'onde, des résultats qui ne mettaient pas en évidence le caractère pourpré de la fondamentale rouge, nous avons entrepris une brève étude expérimentale complémentaire avec un filtre interférentiel de 700 mμ. Ce travail nous a permis de mettre en évidence :

- d'une part, la supériorité de notre méthode de recherche du seuil chromatique en lumière ascendante sur la méthode utilisée par SEGAL, qui conduit à des phénomènes complexes très voisins de ceux de l'adaptation chromatique ;

- d'autre part, l'importance des phénomènes d'adaptation temporelle dans ce genre de recherche : un sujet adapté longtemps à l'obscurité ne se comporterait plus comme un trichromate normal, mais comme un observateur légèrement deutéranomal.

Enfin, l'étude de nos résultats en vision photopique nous a amené à préciser la tonalité verte et non vert-bleu de la deuxième fondamentale. Cependant, il nous semble s'agir, là, uniquement d'un problème linguistique, et notre travail aurait été inutile s'il ne nous avait permis des comparaisons fructueuses et une interprétation générale des phénomènes en présence desquels nous nous sommes trouvé.

Nous estimons, dans l'ensemble, avoir abouti à des conclusions satisfaisantes, et nous pensons apporter quelques faits nouveaux dans l'étude passionnante de la vision colorée. Cependant, nous avons tenu à rester à l'écart des théories chromatiques, pour n'exposer qu'une interprétation des faits expérimentaux observés, en laissant à des gens plus compétents que nous le soin de les inclure dans des conceptions théoriques.

VU & PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur
de l'Académie de Paris,

J. SARRAILH

Le Doyen de la Faculté
de Médecine,

L. BINET

Le Président
de la thèse,

L. GOUGEROT

B I B L I O G R A P H I E

Malgré le nombre considérable de travaux d'optique physiologique, peu d'auteurs ont envisagé la vision colorée au seuil sous l'angle que nous venons de développer. L'unique travail à visées statistiques que nous connaissons est celui de GÖTHLIN ; mais nous nous sommes servi, au cours de notre étude, de publications d'optique physiologique et de quelques ouvrages de statistique dont nous donnons ci-après les références.

°
° °

BOLL (M.) et DOURGNON (J.) - Le secret des couleurs.- ("Que sais-je ?" - Presses Universitaires de France, 108, Boulevard Saint-Germain, Paris ; 1956).

BOREL (E.), DELTHEIL (R.) et HURON (R.) - Probabilités et erreurs. (Col. Armand Colin, 103, Boulevard Saint-Michel, Paris ; 1954).

DAGHER (M.), CRUZ (A.) et PLAZA (L.) - Colour thresholds with monochromatic stimuli through the spectrum. I region 530-630 mμ. (Symposium on visual problems of colour, paper 23, Teddington, Middlesex, England, 23 rd to 25 th September 1957).

GÖTHLIN (Gustaf F.) - Experimental determination of the short wave fundamental color in man's color sense. (Journal of the Optical Society

of America, March 1944, pages 147-158).

GOUGEROT (L.), KELLERSHOHN (C.), BRESSON (Y.) -
Sur la nature de la fondamentale de courte
longueur d'onde. (Publication à la Société
de Biologie, Séance du Samedi 24 Octobre 1959).

HARTRIDGE HAMILTON - Recent advances in the physi-
ology of vision. (J. and A. Churchill L.T.D,
1950, London).

JUDD (Deane B.) - Color in business, science and
industry. (New-York, John Wiley and Sons
inc.- Chapman and Hall, L.T.D., London).

KELLERSHOHN (C.) - Adaptation chromatique et lumière
blanche. Die farbe 4 (1955), H 4/6.

LAMOTTE (M.) - Initiation aux méthodes statistiques
en biologie. (Masson et Cie, éditeurs, 120,
Boulevard Saint-Germain, Paris ; 1957).

LEGRAND (Yves) - I/- Optique physiologique (particu-
lièrement : Tome II : "Lumière et couleur") -
Edition de la "Revue d'Optique", 165, Rue de
Sèvres, Paris.

II/- Colour theories and their impli-
cations in colour vision. (Symposium on visual
problems of colour, paper 21, Teddington,
Middlesex, England, 23 rd to 25 th September
1957).

MEYERSON (Ignace) - Problème de la couleur. (Expo-
sé et discussions du Colloque du Centre de
Recherches de Psychologie comparative, tenu à
Paris les 18-19-20 Mai 1954). (S.E.V.P.E.N.,
13, Rue du Four, Paris ; 1957).

NYUBERG (N.D.) and YUSTOVA (E.N.) - Researches on
dichromatic vision and the spectral sensi-

vity of the receptors of trichromats.
(Symposium on visual problems of colour,
paper 32, Teddington, Middlesex, England,
23 rd to 25 th September 1957).

PARSON (Herbert) - An introduction to the study
of colour vision. (Cambridge University,
Press, 1915).

SEGAL (J.) - Le mécanisme de la vision des cou-
leurs.- (Paris, G. Doin ; 1953).

TRAYNARD (C.E.) - Eléments de statistique et de
calcul des probabilités. (Dunod, Paris, 1959).

WRIGHT (W.D.) - Researches on normal and defective
colour vision. (London, Henry Kimpton, 25,
Bloomsbury Way, W.C.I. ; 1946).

AUTRES AUTEURS CITES

En ce qui concerne les références bibliographiques des travaux des auteurs ci-après, nous renvoyons à des traités classiques d'optique physiologique.

FICK - Cité par Yves LEGRAND.

GRANIT (R.) - Cité par Yves LEGRAND.

HELMHOLTZ (H. von) - Cité par Yves LEGRAND et
PARSON.

HERING - Cité par Yves LEGRAND.

KÖNIG (H.) - Cité par Yves LEGRAND.

LADD (Franklin) - Citée par PARSON.

LEGROS CLARK - Cité par Yves LEGRAND.

PIERON (H.) - Cité par Yves LEGRAND.

PITT (F.G.H.) - Cité par Yves LEGRAND.

STILES (W.S.) - Cité par Yves LEGRAND.

WALTERS - Cité par Yves LEGRAND.

A P P E N D I C E

Nous donnons, dans les tableaux ci-après,
les résultats partiels de nos calculs statistiques.

ETUDE STATISTIQUE DES REPONSES "BLEU-VIOLET"

Classe L	x : point médian	y : fréquence absolue	$\frac{\Delta}{\uparrow}$	y $\uparrow$	y($\frac{\Delta}{\uparrow}$) ²
410-420	415	1	-4	-4	16
420-430	425	3	-3	-9	27
430-440	435	9	-2	-18	36
440-450	445	13	-1	-13	13
450-460	455	21	0	0	0
460-470	465	16	1	16	16
470-480	475	3	2	6	12
		$\Sigma y = 66$	$\Sigma y \frac{\Delta}{\uparrow} = -22$	$\Sigma y (\frac{\Delta}{\uparrow})^2 = 120$	

Classe L	x	y	$\bar{x} = \frac{L-m}{\sigma}$	$\phi(\bar{x})$	$\Delta \phi$	$\frac{\Delta \phi}{2}$	y' = $\Sigma y \frac{\Delta \phi}{2}$
410			-3,159	-0,998			
420	415	1	-2,401	-0,984	0,014	0,007	0,462
430	425	3	-1,643	-0,898	0,086	0,043	3,838
440	435	9	-0,886	-0,625	0,273	0,1365	9,009
450	445	13	-0,128	-0,104	0,521	0,2605	17,293
460	455	21	0,628	0,471	0,575	0,2875	18,975
470	465	16	1,386	0,837	0,366	0,183	12,078
480	475	3	2,143	0,967	0,130	0,065	4,29

x	y	y'	$\frac{(y-y')^2}{y'}$	$\bar{x} = \frac{x-m}{\sigma}$	γ	$\gamma' = \frac{\gamma \Sigma y}{\sigma}$
415	1	0,462	0,626	2,78	0,0084	0,04
425	3	3,838	0,182	2,02	0,052	0,26
435	9	9,009	0	1,265	0,17905	0,895
445	13	17,293	1,065	0,507	0,35067	1,75
455	21	18,975	0,216	0,25	0,386	1,93
465	16	12,078	1,336	1,007	0,24032	1,20
475	3	4,29	0,397	1,765	0,08425	0,42

ETUDE STATISTIQUE DES REPONSES "BLEU"

Classe L	x : point médian	y : fréquence absolue	$\frac{\Delta}{1}$	y $\frac{\Delta}{1}$	y $(\frac{\Delta}{1})^2$
450-460	455	4	- 2	- 8	16
460-470	465	23	- 1	- 23	23
470-480	475	34	0	0	0
480-490	485	21	1	21	21
490-500	495	2	2	4	8
500-510	505	1	3	3	9
		$\Sigma y = 85$	$\Sigma y \frac{\Delta}{1} = -3$		$\Sigma y (\frac{\Delta}{1})^2 = 77$

Classe L	x	y	$X = \frac{L-m}{\sigma}$	$\phi(X)$	$\Delta \phi$	$\frac{\Delta \phi}{2}$	$y' = \frac{\Delta \phi}{2}$
450	455	4	- 2,64	-0,9918	0,1018	0,0509	4,3268
460	465	23	- 1,60	-0,89	0,475	0,2375	20,1878
470	475	34	- 0,55	-0,415	0,788	0,394	34,490
480	485	21	0,49	0,373	0,503	0,251	21,335
490	495	2	1,53	0,876	0,1144	0,0572	4,862
500	505	1	2,58	0,9904	0,0093	0,0046	0,395
510			3,62	0,9997			

x	y	y'	$\frac{(y-y')^2}{y'}$	$X' = \frac{x-m}{\sigma}$	γ	$\gamma' = \gamma \frac{\Sigma y}{\sigma}$
455	4	4,326	0,024	2,1234	0,0419	0,37
465	23	20,187	0,391	1,0774	0,2234	1,99
475	34	34,490	0,006	0,0313	0,3984	3,54
485	21	21,335	0,005	1,0146	0,2385	2,12
495	2	4,862	1,684	2,0606	0,0479	0,425
505	1	0,395	0,926	3,1066	0,0040	0,035

ETUDE STATISTIQUE DES REPONSES "BLEU-VERT"

Classe L	x : point médian	y : fréquence absolue	$\frac{\Delta}{L}$	$y \cdot \frac{\Delta}{L}$	$y \left(\frac{\Delta}{L}\right)^2$
470-480	475	8	-1	-8	8
480-490	485	23	0	0	0
490-500	495	20	1	20	20
500-510	505	13	2	26	52
510-520	515	8	3	24	72
520-530	525	5	4	20	80
530-540	535	1	5	5	25
$\Sigma y = 78$			$\Sigma y \frac{\Delta}{L} = 87$		$\Sigma y \left(\frac{\Delta}{L}\right)^2 = 257$

Classe L	x	y	$x = \frac{L-m}{\sigma}$	$\theta(x)$	$\Delta \theta$	$\frac{\Delta \theta}{2}$	$y' = y \frac{\Delta \theta}{2}$
470			-1,80	-0,928			
	475	8			0,194	0,097	7,566
480			-1,11	-0,734			
	485	23			0,410	0,205	15,990
490			-0,42	-0,324			
	495	20			0,540	0,270	21,060
500			0,27	0,216			
	505	13			0,444	0,222	17,316
510			0,96	0,660			
	515	8			0,2405	0,12025	9,3795
520			1,65	0,9005			
	525	5			0,0810	0,0405	3,159
530			2,35	0,9815			
	535	1			0,0162	0,0081	0,6318
540			3,04	0,9977			

x	y	y'	$\frac{(y-y')^2}{y'}$	$x' = \frac{x-m}{\sigma}$	γ	$\gamma' = \gamma \frac{\Sigma y}{\sigma}$
475	8	7,566	0,024	1,4632	0,13636	0,74
485	23	15,490	3	0,7697	0,2959	1,60
495	20	21,060	0,053	0,0762	0,39747	2,15
505	13	17,316	1,075	0,6171	0,32940	1,78
515	8	9,3795	0,2028	1,13106	0,16866	0,91
525	5	3,159	1,028	2,0041	0,05358	0,29
535	1	0,6318	0,021	2,6976	0,01009	0,055

ETUDE STATISTIQUE DES REPNSES "VERT"

Classe L	x : point médian	y : fréquence absolue	$\frac{\Delta}{L}$	$y \frac{\Delta}{L}$	$y \left(\frac{\Delta}{L}\right)^2$
480-490	485	1	- 5	- 5	25
490-500	495	23	- 4	-92	368
500-510	505	31	- 3	-93	279
510-520	515	37	- 2	-74	148
520-530	525	40	- 1	-40	40
530-540	535	41	0	0	0
540-550	545	31	1	31	31
550-560	555	8	2	16	32
		$\Sigma y = 222$	$\Sigma y \frac{\Delta}{L} = -257$		$\Sigma y \left(\frac{\Delta}{L}\right)^2 = 923$

Classe L	x	y	$x = \frac{L-m}{\sigma}$	$\theta(x)$	$\Delta \theta$	$\frac{\Delta \theta}{2}$	$y' = \Sigma y \frac{\Delta \theta}{2}$
480			- 2,67	-0,9924			
490	485	1	- 2,06	-0,9604	0,0320	0,016	3,5520
	495	23	- 1,44	-0,852	0,1084	0,0542	12,0324
500	505	31	- 0,83	-0,595	0,257	0,1285	28,5270
510	515	37	- 0,21	-0,168	0,427	0,2135	47,3970
520	525	40	0,40	0,310	0,478	0,239	53,0580
530	535	41	1,01	0,685	0,3750	0,1875	41,6250
540	545	31	1,63	0,8963	0,21130	0,1056	23,5443
550	555	8	2,24	0,9748	0,0785	0,0392	8,7135

x	y	y'	$\frac{(y-y')^2}{y}$
485	1	3,552	1,833
495	23	12,0324	9,997
505	31	28,527	0,214
515	37	47,397	2,280
525	40	53,058	3,213
535	41	41,625	0,009
545	31	23,4543	2,4275
555	8	8,7135	0,0584

